

La machine à vapeur est à deux cylindres accouplés, consommant 4000 kilog. de houille par jour, soit 2^{kg}.50 par cheval et par heure.

Dans ces établissements la consommation d'huile est de 0,482 kilog. par 1000 broches et par jour, c'est-à-dire les 58 % de la consommation de la majeure partie des établissements de notre contrée.

ÉTUDES

Sur les principaux phénomènes que présentent les frottements médiats, et sur les diverses manières de déterminer la valeur mécanique des matières employées au graissage des machines; mémoire présenté par M. G.-AD. HIRN, dans la séance du 28 Juin 1854.

MESSIEURS,

Lorsque, il y a trois mois, je fus invité par M. votre président à vous communiquer le résultat des recherches auxquelles je m'étais livré pour trouver une bonne méthode applicable à l'essai des huiles employées au graissage des machines, je pensais n'avoir qu'à réunir les matériaux assez nombreux que j'avais en portefeuille et en faire un résumé, pour être à même de satisfaire promptement à vos désirs.

La lettre que m'adressa M. votre président m'avait toutefois fait sentir que vous compreniez toute l'étendue et l'importance du sujet sur lequel vous me faisiez l'honneur de me consulter; elle m'avait prouvé aussi que c'était dans toute son extension que vous désiriez voir traiter la question. Un devoir impérieux m'était par suite imposé : c'était de ne vous livrer que des données dont l'exactitude fût à la hauteur des progrès de la mécanique et des exi-

gences actuelles de l'industrie, et dont par conséquent l'ensemble fût digne de la Société industrielle. Je dus donc naturellement revoir, vérifier, étendre ce que j'avais fait ; je répétai une partie de mes expériences et bientôt je me trouvais engagé, pour ainsi dire à mon insu et malgré moi, dans une série de recherches dont je n'avais pas prévu la longueur et dont les difficultés, imprévues aussi, m'eussent peut-être rebuté, si dès le principe je n'avais vu de loin apparaître des faits nouveaux et importants pour la science pure comme pour la pratique la plus positive. Ainsi qu'il arrive presque toujours en pareil cas, je n'eus ensuite qu'à m'applaudir d'avoir persévéré. Les faits que je n'avais qu'entrevis dans le lointain se confirmèrent, et se groupèrent naturellement entre eux ; je pus en déduire quelques lois générales et je vis que leur étude était non seulement intéressante en elle-même, mais utile dans ses conséquences. C'est l'ensemble de ces recherches que je puis enfin vous soumettre aujourd'hui. Mon travail renferme, comme vous verrez, les éléments les plus disparates et les plus étrangers en apparence au sujet que vous m'avez donné à traiter. Quelques-unes des questions qu'il embrasse semblent ne concerner que la mécanique ou même la physique pures ; d'autres, bien que plus voisines de mon sujet, semblent encore prises sous un point de vue trop abstrait pour offrir un côté utile. Quand même il en eût été ainsi en réalité, je ne me serais pas cru autorisé à scinder mon travail et à ne vous en présenter qu'une partie ; car, si je suis arrivé à quelques lois nouvelles de physique, c'est en un sens à vous que j'en suis redevable, et c'est par conséquent à vous que j'en devais rendre hommage. Bien que par la nature de votre institution vous soyez appelés à vous occuper plus particulièrement de faits pratiques et d'une application immédiate, ce n'est cependant pas là la destination exclusive de la Société industrielle : c'est ce dont font foi bien des travaux scientifiques remarquables qui y ont paru, et aussi les belles collections d'art et d'histoire naturelle qui y prennent tous les jours plus d'accroissement. Mais, si je sais mettre clairement en relief les liens qui unissent en réalité les élé-

ments si divers de mon mémoire, on reconnaîtra que tous ont des conséquences utiles et pratiques, et j'ai l'espoir que l'ensemble offrira de l'intérêt tout à la fois aux personnes qui s'arrêtent plus volontiers au côté applicable des choses et à celles qui suivent les progrès des sciences pures. J'ai d'ailleurs cherché à diviser mon exposition de manière à ce que la lecture n'en soit pas pénible et de manière à ce que chacun aperçoive à première vue ce qui peut lui offrir le plus d'intérêt ; j'en ai séparé, pour le porter sur des tableaux distincts et aussi étendus qu'il était nécessaire, tout ce qui réclame réellement une réflexion et une attention soutenues pour être bien compris, me bornant dans le texte proprement dit à présenter des conclusions faciles à saisir. Et ce texte lui-même, je l'ai divisé en trois parties : la première est consacrée à l'exposition des faits de science pure ; la troisième l'est à celle des faits d'application utile et pratique ; la seconde sert de lien à ces deux extrêmes.

Avant de procéder à l'exposition de mes recherches, je dois présenter ici quelques réflexions qui porteront sur la question qui m'a été soumise, considérée sous un point de vue général, qui montreront si j'ai bien compris les vues de la Société industrielle, et qui serviront ainsi naturellement d'entrée en matière.

L'un des principes fondamentaux que doit se poser tout industriel, l'un de ceux qu'il doit avoir sans cesse en vue d'appliquer, c'est de tendre à diminuer par tous les moyens possibles ses frais de production et d'entretien. L'un des éléments principaux de ces frais, et le seul en tous cas dont nous ayons à nous occuper ici, c'est la force motrice, toujours nécessaire pour produire quoi que ce soit. Cette force, en effet, n'importe son origine, coûte toujours, et sous deux points de vue. 1° Elle coûte en elle-même. Le fait est évident, lorsqu'elle est produite par le calorique (dans la vapeur, etc.), par tout autre fluide impondérable, ou par la vie organique (la force humaine ou animale). Mais le fait subsiste même lorsqu'elle dérive de la gravité, c'est-à-dire, et pour préciser, lorsqu'elle est donnée par une chute d'eau : il est, en effet, peu d'é-

tablissements hydrauliques assez heureusement situés pour ne pas chômer à certaines époques de l'année. C'est, dans ce cas, le manque de force qui coûte, et quelquefois bien plus que la force elle-même lorsqu'elle est produite toute entière par la vapeur, par exemple. 2° La force coûte par l'usure des matériaux, qui en est une conséquence directe. Diminuer autant qu'il est possible la force motrice absorbée, telle doit donc être la conséquence naturelle du principe d'économie générale émis plus haut.

La force absorbée par un ensemble de machines quelconques se compose de deux parties. L'une est employée à produire; elle est absorbée utilement. L'autre est employée à surmonter des résistances passives de tous genres; elle est perdue pour le travail proprement dit. Nous devons par suite chercher à réduire autant qu'il se peut cette perte. Dans la réalité, et c'est peut-être ce que l'on n'a pas assez remarqué jusqu'ici, il s'en faut bien que la force perdue ne soit qu'une fraction insignifiante de celle qu'on utilise; généralement c'est bien l'inverse qui a lieu, et la partie utilisée est dépassée de beaucoup par la partie perdue. C'est ainsi, pour fixer les idées, c'est ainsi que si nous faisons l'examen des machines diverses qui composent une filature de coton, nous trouvons que, dans le batteur, la force perdue est au moins égale à la force utilisée à travailler le coton, et que, dans le métier à filer, la seconde de ces forces n'est plus qu'une très-petite fraction de la première¹.

Si nous examinons quelle est l'origine de cette perte, presque toujours si considérable, nous trouvons qu'à très-peu d'exceptions près, elle dérive du *glissement des pièces mouvantes sur les pièces*

¹ Lorsqu'on fait marcher ces machines sans coton, on arrive au résultat énoncé dans le texte; mais il est bien clair que la différence des forces absorbées par la machine à vide, et puis chargée de coton, n'indique pas la force absorbée pour ouvrir celui-ci, puisque tous les frottements de la machine se trouvent accrus par suite même du travail qu'elle exécute. Par cette raison, on serait peut-être beaucoup plus près de la vérité en disant que le travail même du coton n'entre pas pour le quart dans la force consommée par le batteur.

en repos; elle dérive en un mot du FROTTEMENT. Dans le métier à filer et même la plupart des autres machines de filature, dans les calandres et les machines à imprimer les étoffes, etc., etc., le frottement (et je ne parle ici que de celui qui ne concourt en rien dans l'effet que l'on veut obtenir) est la cause presque unique de la perte de force passive. Les exceptions concernent les machines peu nombreuses où des pièces importantes passent alternativement du repos au mouvement, et du mouvement au repos, sans rien rendre au moteur de ce qu'il leur avait donné : tel est, par exemple, le cas de la navette dans le métier à tisser.

On conçoit, dès ce moment, de quelle manière nous avons en quelque sorte prise sur la force motrice consommée par un établissement; de quelle manière nous pourrions espérer la réduire à son plus juste minimum : ce sera en étudiant d'une manière générale et approfondie toutes les circonstances du frottement, tout ce qui concourt à l'augmenter sans aucun bénéfice pour l'ouvrage que l'on produit, tout ce qui concourt à le diminuer sans aucun détriment pour cet ouvrage. Cette étude se divise naturellement en deux branches distinctes. 1° Le frottement est à considérer dans ses rapports avec la nature des deux corps solides glissant l'un sur l'autre, avec leur étendue de contact, avec la pression qui établit ce contact, avec leur vitesse relative. 2° Dans la plus grande généralité des cas, on est obligé d'interposer entre les deux surfaces en regard, une matière lubrifiante qui non seulement prévienne leur usure trop rapide, mais qui, encore et surtout, contribue à diminuer l'effort nécessaire au déplacement relatif; le frottement, en un mot, est presque toujours MÉDIAT, et ce n'est que dans des cas excessivement rares (et alors nécessaires ¹), qu'il est direct ou IMMÉDIAT. C'est cette seconde partie de l'étude du frottement médiat qui touche directement à l'examen général des huiles

¹ Calandres à lustrer les tissus, freins des locomotives, etc., etc. Il est clair qu'ici on ne cherche nullement à diminuer le frottement, mais bien au contraire à le rendre très-considérable.

et des graisses, considérées de la sorte comme de vrais agents mécaniques.

D'après toutes les considérations que j'ai présentées plus haut, je ne pense pas avoir besoin d'insister sur l'utilité de l'étude du frottement : mon intention, je l'ai dit, était bien moins d'en faire ressortir l'importance que de montrer que j'ai moi-même bien senti celle-ci, et qu'ainsi j'ai su entrer dans les vues de la Société industrielle. Si cependant un chiffre était nécessaire pour caractériser cette importance aux yeux des personnes qui ne s'occupent pas directement de mécanique, je dirais de suite ici que la force absorbée par une même filature de coton, par exemple, peut varier de 400 à 65, selon les combinaisons plus ou moins judicieuses des pièces frottantes, selon la qualité de la matière lubrifiante employée, etc., etc. Il va sans dire que, sous ces derniers points de vue, je ne cite que ce qui a lieu effectivement dans la pratique; j'aurais pu citer d'autres exemples aussi, si je n'avais voulu me tenir strictement dans les limites de mes propres observations. Or, une réduction possible de 35 % sur la force motrice consommée par un établissement, donne aux études sur lesquelles repose cette réduction tous les caractères d'une question d'économie de premier ordre.

Dans ce mémoire je ne m'occuperai, comme de raison, que des frottements médiats; et ceux-ci même, je ne les considérerai principalement que dans leurs rapports avec la matière lubrifiante interposée. Cependant je n'ai pas cru devoir me tenir exclusivement dans ces dernières limites; en premier lieu, parce que, comme on le verra bientôt, cela m'eût été réellement impossible; en second lieu, parce que les autres conditions du frottement sont trop intéressantes pour être passées sous silence, lorsqu'un observateur trouve de nouvelles notions à ajouter à leur connaissance.

Voyons, d'une manière générale, quelles sont les conditions essentielles qu'une huile doit remplir pour être bonne, et quelle est la voie par laquelle nous pourrions savoir si une huile remplit ces conditions.

Ces dernières d'abord sont fort simples à énoncer. « Diminuer le plus possible, toutes choses égales d'ailleurs, la valeur du frottement des pièces en mouvement relatif », telle doit être visiblement la première et en quelque sorte la seule qualité à exiger d'une huile. En effet, le prix même de l'huile, la quantité qu'il faut en employer pour atteindre le but, etc., etc., ont dans la réalité peu d'importance, lorsque la condition principale est atteinte. Une économie sur la force motrice, ne fût-elle que de 10 %, est presque partout de nature à compenser les frais premiers ou d'autres inconvénients que pourrait entraîner une huile. En ce sens, et dans de justes limites, une huile véritablement bonne ne coûte jamais trop; et c'est certes ici le cas de dire que c'est en réalité le bon marché qui coûte le plus cher à l'industriel.

Une fois que nous avons ainsi fixé ce qui constitue la véritable valeur d'une huile, il va nous être facile de pressentir les moyens par lesquels nous pourrions constater cette valeur. Une foule de procédés ont été proposés pour essayer les huiles. Les uns reposent sur leurs propriétés chimiques, d'autres sur leurs propriétés physiques; d'autres, enfin, sur leurs *qualités mécaniques*. Comme ce sont, en dernière analyse, celles-ci que nous voulons connaître, il nous est aisé de faire une critique générale qui s'appliquera à toutes les méthodes.

La chimie peut nous aider à reconnaître promptement si une huile est siccatrice ou non : en ce sens, elle nous fera connaître si une huile est absolument impropre à l'usage auquel elle est destinée. Elle peut même nous dire quelle est l'origine d'une huile, quel est son degré de pureté, etc. : en ce sens, une fois que, par une autre voie, nous connaissons la valeur mécanique de cette huile, l'analyse chimique pourra nous diriger dans l'achat de cette même huile. Mais (s'il m'est permis ici de faire cette comparaison), il n'est évidemment pas plus possible à l'analyse de nous dire *à priori* la valeur mécanique de telle ou telle huile, qu'il ne lui est possible de prévoir l'action qu'aura sur l'économie animale tel principe

immédiat qu'elle isole. Les méthodes d'essai qui reposent sur des propriétés chimiques ne doivent donc être employées que subsidiairement.

Les propriétés physiques d'une graisse peuvent déjà, du moins approximativement, nous mettre sur la voie de ce que nous cherchons. En effet, nous verrons bientôt que, lorsqu'une huile n'est pas absolument siccative, que lorsqu'en un mot *elle dure* entre les parties qu'elle doit lubrifier, ce n'est plus que dans sa fluidité que dépend sa valeur mécanique. Or, il existe plusieurs procédés qui peuvent nous donner une idée approchée de cette fluidité, et qui, par suite, peuvent servir pour une première approximation : je les mentionnerai en passant.

Enfin, les méthodes qui reposent sur les *propriétés mécaniques* de l'huile sont les plus naturelles et les plus correctes en principe, puisqu'elles mènent directement au but que l'on veut atteindre : ce n'est, en effet, que *mécaniquement* que l'on peut prétendre constater une valeur mécanique. Il ne s'agit donc ici que de faire un choix judicieux parmi les appareils à employer. Nous verrons bientôt combien il faut être rigoureux sous ce rapport, lorsqu'on veut arriver à des résultats comparatifs et toujours identiques.

Après ces premières observations, dont aucune, j'espère, n'aura semblé déplacée et dont quelques-unes étaient indispensables, je vais présenter successivement et dans l'ordre que j'ai indiqué, les résultats de mes diverses observations sur les frottements médiats.

PREMIÈRE PARTIE.

Études sur les principaux phénomènes que présentent les frottements médiats.

Je parlerai ailleurs des nombreux tâtonnements par lesquels j'ai eu à passer avant de parvenir à un appareil qui pût, dans tous les cas donnés, faire connaître fidèlement la valeur du frottement : il est peu de problèmes pratiques plus difficiles à résoudre, sous

tous les rapports. L'instrument auquel je me suis arrêté se trouve décrit avec les détails nécessaires sur la planche 203, fig. 4 et 2. Sa manière de fonctionner est des plus simples et se comprend à première vue. Le tambour TT étant en repos, le levier LL' lié au coussinet EE'E posé sur ce tambour, était parfaitement équilibré de manière à se tenir horizontal (je dirai plus loin comment je l'ai équilibré : quoiqu'avec tous ses agrès il pesât 50 kil., j'étais sûr de son équilibre à 5 gram. près). Le tambour, étant convenablement graissé et tournant dans le sens *h k*, tendait nécessairement, par suite de son frottement contre le coussinet, à entraîner tout l'ensemble du levier LL' : les poids qu'il fallait mettre sur le plateau PP pour ramener l'équilibre, servaient donc réellement à *peser* la valeur du frottement. Ainsi qu'on peut s'en assurer par la légende de la planche 203, cet instrument était disposé d'ailleurs de manière à faire connaître les plus minimes circonstances du frottement.

§ I^{er}. Lorsque je voulus utiliser cette balance si délicate pour apprécier la valeur des huiles, etc., car c'était là sa destination première, je m'aperçus que j'avais à exécuter le travail préparatoire auquel, dans les sciences d'observation, sont condamnés tous les expérimentateurs : étudier l'instrument en lui-même, dans ses défauts, dans ses anomalies, pour pouvoir faire la part des circonstances fortuites et avoir ainsi la mesure juste de sa précision. Ce travail préliminaire, que je ne regardais que comme un moyen d'arriver à des corrections accessoires et par suite à plus d'exactitude dans mes résultats, ce travail me mit bientôt sur la voie d'un tout autre ordre de faits. Après être parvenu à me rendre maître des irrégularités dérivant de circonstances que je pouvais mettre à l'écart, je ne tardai pas à voir que, dans chaque expérience, l'instrument passait d'abord par plusieurs périodes d'inégalités avant de donner des résultats constants : c'était donc là un premier ordre de faits à étudier. Je procédais en général des deux manières suivantes dans mes expériences : tantôt je laissais le bas du tambour TT plonger dans un bain d'huile, afin d'avoir une

régularité parfaite de graissage ; tantôt je retirais ce bain après quelque temps de marche et je n'ajoutais plus dès lors aucune huile pendant le restant de l'opération : c'est à très-peu près dans ce cas que se trouvent les pièces des machines que l'on ne graisse que périodiquement. Tantôt aussi je maintenais la température de l'appareil constante à l'aide d'un courant d'eau froide passant par le tambour ; tantôt je la laissais s'élever librement par suite du calorique développé par le frottement. Dans tous ces cas, voici ce que je remarquai. Il fallait d'abord un poids relativement très-fort pour faire équilibre au frottement ; au bout de quelque temps, le levier commençait à osciller très-fort, de manière à empêcher toute pesée ; bientôt ces oscillations se calmaient et la charge à mettre sur le plateau diminuait jusqu'à une certaine limite variable pour chaque graisse. Puisque ce phénomène avait lieu, que la température du coussinet fût tenue constante ou non (bien qu'à la vérité à des degrés très-différents), je dus en conclure naturellement :
« que pour donner un frottement régulier et minimum, la graisse
« a besoin d'être triturée un certain temps entre les surfaces frot-
« tantes. »

Cette conclusion, tout au moins singulière, puisqu'elle concerne des corps liquides, nous montre qu'en ce sens les graisses ressemblent à certaines matières visqueuses employées à épaissir les couleurs dans les fabriques de toiles peintes et qui, elles aussi, acquièrent plus de fluidité, de liant et d'homogénéité par le travail.

§ II. J'observai ensuite, que, lorsque je laissais l'appareil chercher lui-même son équilibre de température, la charge à mettre sur le plateau diminuait à mesure que cette température s'élevait ; au bout d'un certain temps, le mercure du thermomètre de l'appareil s'arrêtait à un degré qui dépendait à la fois de l'espèce d'huile et du degré de chaleur de l'appartement, mais qui était toujours bien supérieur à celui-ci. Une fois la température constante, la charge le devenait aussi et le restait quelquefois 5 à 6 heures avec des huiles de bonne qualité. Il existe donc une relation entre la température et la valeur du frottement. Pour m'en

rendre compte, je fis plonger le bas du tambour dans l'huile, afin d'avoir toute la régularité désirable; puis, à l'aide d'eau chaude ou froide, je fis varier les températures ¹. J'observai qu'à chacune d'elles répondait une charge propre, variable d'une huile à l'autre, mais toujours la même pour un même degré, lorsque l'état des surfaces frottantes restait absolument le même. Dans l'état actuel des sciences, il ne suffit plus d'indiquer l'existence d'un phénomène, il faut encore en déterminer la forme précise et les lois : c'est ce que je m'appliquai à faire. Le tableau E, où j'ai mis en regard les nombres expérimentaux et ceux qui ressortent de la loi mathématique qui me semblait régir ce genre de phénomènes, montre que les premiers, en effet, ne procèdent point au hasard, mais sont au contraire soumis, comme tous les phénomènes qu'on a étudiés de près, à une loi précise. Cette loi peut ici se traduire en langage ordinaire et d'une manière intelligible pour tout le monde.

Connaissant le poids qui, à zéro de thermomètre, fait équilibre au frottement, nous pourrions trouver par le calcul celui qui correspond à toute autre température, en divisant le premier poids par un certain nombre constant multiplié par lui-même autant de fois qu'il y a de degrés depuis zéro jusqu'à la température donnée. Et pour connaître le poids qui répond au zéro du thermomètre centigrade, il n'est nullement nécessaire de faire une expérience à cette température zéro : il nous suffit de relever le poids pour une température quelconque et de le multiplier par notre nombre constant, préalablement multiplié par lui-même un nombre de fois exprimé par le nombre de degrés que marquait le thermomètre pendant l'expérience ².

¹ D'après ce que j'ai appris, M. G. Dollfus aurait trouvé les mêmes résultats que moi. Si le fait est exact, cette confirmation de mes déductions, obtenue par une voie sans doute différente de la mienne et par un jeune observateur aussi zélé, me serait doublement précieuse.

² A étant le poids qui répond à 0°, on a $p = A : 1,0492^t$ et, B étant le poids qui répond à 1°, on a $p = B : 1,0492^{t-1}$, pour une température t .

Chose bien remarquable, ce nombre particulier qui sert ici de facteur, n'est pas seulement constant d'un bout à l'autre de l'échelle thermométrique pour une même huile, il l'est pour toutes les huiles, ou du moins s'il varie, c'est dans des limites si resserrées que je n'ai pu le constater par mes expériences relativement grossières. Ce nombre est à très-peu près 1,0492.

Que résulte-t-il maintenant de cette loi si remarquable ?

Nous voyons d'abord que, dans les limites des températures du moins qui n'altèrent pas les graisses et qui, à la vérité, sont assez peu élevées, nous sommes en quelque sorte maîtres de la valeur du frottement et que nous pouvons la diminuer à volonté.

Nous voyons qu'il n'y a au fond rien de spécifique dans la propriété qu'a telle huile de diminuer beaucoup plus que telle autre la grandeur du frottement, puisqu'à l'aide de températures convenables et variables de l'une à l'autre, nous pouvons arriver à les rendre équivalentes les unes aux autres. Cette propriété dépend à la fois de leur densité, de leur fluidité et de leur viscosité combinées : elle repose donc purement sur leurs propriétés physiques ; car ce sont les seules que les changements de température peuvent modifier d'une manière aussi régulière. S'il y avait quelque chose de spécifique appartenant à chaque huile, il sera bien clair pour tout le monde que le nombre 1,0492 ne pourrait plus leur convenir à toutes indifféremment. Les expériences que j'ai faites avec le viscosimètre (tab. F) confirment tout ce qui précède.

Il est bien clair qu'au-dessous du point où l'huile se fige et au-dessus de celui où elle peut encore exister sans s'évaporer, sans s'altérer, notre loi ne pourra plus rien nous indiquer : ce qui ne signifie pourtant pas qu'au-delà de ces limites elle soit absurde, car elle cesse seulement d'être applicable en raison des propriétés spécifiques de chaque espèce de graisse. Mais, dira-t-on, puisqu'il ne s'agit que de propriétés physiques dans le *pouvoir lubrifiant* de chaque huile, puisque la nature chimique du corps n'y est pour rien, pourquoi bien d'autres corps fluides ne pourraient-ils pas agir comme lubrifiants ? Il doit leur suffire pour cela d'être capa-

bles de *mouiller* les deux surfaces frottantes, et c'est leur fluidité ensuite qui doit constituer leur puissance lubrifiante. Rien de plus juste, en effet, que cette induction. Le tableau F nous apprend que l'eau pouvait servir à lubrifier le coussinet EE'E et son tambour TT, et qu'elle était alors supérieure à la meilleure huile possible. Que dis-je ! le même tableau nous prouve que l'air atmosphérique peut, dans certaines circonstances, devenir le meilleur de tous les lubrifiants ! Peu d'expériences sont plus faites pour étonner que celle qui conduit à cette conclusion. Lorsqu'après avoir laissé travailler la balance de frottement avec une huile quelconque, afin d'égaliser partout la température, on venait à l'essuyer rapidement avec des linges secs et bien propres, de manière à enlever toute trace de graisse, la charge nécessaire pour faire équilibre au frottement tombait tout d'un coup de 3 ou 4 kil. à 40 gram. : le coussinet, malgré le poids énorme de 50 kil. qui le pressait sur le tambour, semblait tout d'un coup nager sur un liquide, tant il se balançait aisément !

Tirerons-nous maintenant, de tout ce qui précède, cette conclusion paradoxale et en tous cas contredite par la plus simple expérience : c'est que tous les corps fluides capables de *mouiller* les métaux pourraient, dans l'industrie, servir comme lubrifiants ? Non, assurément. Pour qu'une matière puisse être réputée lubrifiante, plusieurs conditions différentes sont nécessaires : 1° il faut qu'elle puisse mouiller les surfaces ; 2° il faut qu'elle ne s'évapore et ne s'altère pas trop rapidement ; 3° il faut qu'à la température où elle doit s'employer, elle jouisse du plus haut degré possible de fluidité ; 4° mais il faut qu'à cette fluidité il s'ajoute une certaine *viscosité* qui force la matière à *rester entre les deux surfaces*.

* C'est à l'aide de ce singulier phénomène que j'ai pu équilibrer ma balance mieux qu'aucun autre procédé ne me l'eût permis : il me suffit de faire tourner le tambour dans les deux sens et de prendre pour tare définitive la moitié de la somme des deux faibles poids qu'il fallait pour tenir la balance horizontale dans les deux cas.

Tous ces principes, que le simple bon sens nous dicte, sont admirablement confirmés par les expériences faites à l'aide de la balance de frottement. « Pour que l'eau et l'air pussent y agir comme « lubrifiants, il fallait que le tambour tournât assez vite pour les « entraîner sous le coussinet. Dès que la vitesse diminuait jusqu'à « un certain degré, les deux fluides, *non visqueux*, étaient expulsés par la pression, les deux surfaces arrivaient en contact immédiat, et le frottement devenait tout d'un coup énorme. »

Fluidité et viscosité réunies à un degré convenable, telles sont donc les deux qualités que doit avoir une matière pour pouvoir être employée à titre de lubrifiant. Or, si chacune d'elles isolément constitue une propriété physique, il n'en est pas moins vrai que leur réunion dérive de la composition même de la matière et qu'elle forme ainsi une qualité spécifique à celle-ci. C'est ce qui nous fait comprendre pourquoi il n'y a qu'une certaine classe de matières organiques qui puissent réellement être employées dans la pratique. Les graisses sont en effet les seuls corps connus jusqu'ici, qui, à la fluidité, joignent une propriété en apparence contradictoire : la viscosité ; c'est-à-dire, qui aient la propriété d'adhérer fortement sans cesser de glisser, de couler, pour cela.

§ III. Passons maintenant à un autre ordre de phénomènes où le calorique se trouve encore en jeu, mais d'une façon bien différente.

Lorsque notre balance de frottement travaillait avec une huile quelconque, avec de l'eau, avec de l'air, comme lubrifiant, le tambour et le coussinet s'échauffaient graduellement jusqu'à un certain point, et la charge du plateau de balance allait en diminuant jusqu'à ce que ce point fût atteint. Ce premier énoncé se conçoit aisément. Tout frottement développe du calorique : l'appareil devait donc nécessairement s'échauffer. Tout corps perd sans cesse du calorique et *se refroidit*, s'il n'en reçoit autant qu'il en perd ; il en perd d'autant plus, en un même temps, que sa température est plus élevée que celle du milieu où il se trouve. L'appareil devait donc s'échauffer jusqu'à ce que la quantité de calorique perdue

par les parois devînt précisément égale à celle que développait le frottement.

Mais je ne tardai pas à m'apercevoir que, pour chaque matière lubrifiante, le thermomètre s'arrêtait à un point différent, et que ce point était toujours d'autant plus élevé que, toutes choses égales d'ailleurs, la charge à mettre sur le plateau était plus grande. Une question naturelle, mais du plus haut intérêt au point de vue de la physique, se présentait ici :

Quelle était la relation existant entre la quantité absolue de calorique développée et la vitesse, la grandeur du frottement, la nature de la matière lubrifiante et la température même de l'instrument? Cette quantité était-elle simplement proportionnelle au travail mécanique dépensé, ou variait-elle, à travail égal, d'une huile à l'autre?

C'est ce problème que je me suis mis en devoir de résoudre, avec tous les soins et toute l'attention dont je pus disposer. Les tableaux A, B et C montrent, avec tous les détails voulus, de quelle manière l'expérience fut conduite et à laquelle des deux questions posées elle répondit affirmativement. Telle est la loi simple que nous pouvons formuler :

« La quantité absolue de calorique développé par le frottement
« médiat est directement et uniquement proportionnelle au travail
« mécanique absorbé par ce frottement. Et si nous exprimons le
« travail en kilogrammes, élevés à un mètre de hauteur, et la
« quantité de calorique en calories, nous trouvons que le rapport
« de ces deux nombres est à très-peu près 0,0027, quelles que
« soient la vitesse et la température, quelle que soit la matière
« lubrifiante. »

Ou, pour parler maintenant avec la réserve qu'impose la science moderne, je dirai : que si le rapport de la quantité de calorique produit à la quantité de travail dépensé varie, c'est dans des limites tellement resserrées que cette variation a échappé à mes moyens d'observation relativement imparfaits.

En traduisant cette loi d'une manière plus claire encore en

chiffres, nous dirons que si, par suite du frottement médiat, nous avons dépensé un travail mécanique représenté par un poids de 370 kil. élevé à 4 mètre de hauteur, ce frottement aura produit une calorie, c'est-à-dire une quantité de calorique capable d'élever de 4° centig. la température de 1 kil. d'eau, quelle qu'ait été la durée de ce travail, quelle qu'ait été la matière lubrifiante interposée, et à quelque température qu'on ait opéré¹.

Nous voyons donc encore que, quant à la chaleur dégagée par suite du frottement médiat, il n'y a rien qui repose sur une qualité spécifique de chaque huile. Telle huile développe en un temps donné plus de chaleur que telle autre, parce qu'étant moins fluide elle donne plus de frottement et, par conséquent, fait absorber plus de travail que l'autre dans le même temps; mais, à travail égal, et en faisant par suite abstraction du temps, nous voyons que les huiles les plus différentes donnent les mêmes résultats calorifiques totaux. D'après plusieurs expériences, trop imparfaites à la vérité pour que je me permette de les donner ici, j'ai pu m'assurer que l'eau, que l'air même sont soumis à la même loi que les huiles, lorsqu'on parvient à les employer comme lubrifiants.

Cette loi de physique si simple nous montre une fois de plus la justice inflexible que la nature déploie dans les plus minimes phénomènes. Pour un travail donné, pour un effort dépensé, nous obtenons une quantité de calorique proportionnée, ni plus, ni moins. Voici donc, et sous une forme bien détournée, un nouvel argument (si toutefois il en faut un de plus) contre cette opinion qu'ont encore aujourd'hui plus de personnes qu'on ne le pense : c'est qu'il est possible de *créer une force*, c'est-à-dire de *produire une force sans dépense*. Opinion qui mène forcément, d'une manière plus ou moins directe, à l'idée du mouvement perpétuel.

Je ne suis pas encore en mesure de dire si notre coefficient

¹ Cette loi remarquable a été posée, pour la première fois, d'une manière tout-à-fait générale, par M. Mayer, de Heilbronn. Voyez à ce sujet la notice qui suit ce mémoire.

0,0027, constant pour toute espèce de matière lubrifiante, le serait pour toutes espèces de corps solides servant de surfaces frottantes : je ne hasarderai même à cet égard aucune supposition ; c'est à l'expérience seule à décider. Mais ce que je dois dire de suite, et c'est une restriction bien importante à notre loi, c'est qu'elle ne s'applique qu'au cas exclusif où le frottement ne produit aucune altération, ni dans la nature de la matière lubrifiante, ni dans l'état des surfaces frottantes. Lorsque le coussinet et le tambour étant séchés et *lubrifiés par l'air*, il y tombait des poussières, etc., ou bien lorsqu'étant graissés, l'huile contenait des impuretés solides (poussière, plâtre, etc.), le rapport du travail absorbé et du calorique développé changeait complètement. Le tableau D montre combien il dépassait 0,0027, lorsque l'instrument marchait à sec et *s'usait par places* ; les expériences que j'ai faites avec des graisses troubles (telles que les suifs si souvent frelatés de plâtre, etc.), sont trop irrégulières pour que j'en donne autre chose ici que les déductions auxquelles elles m'ont conduit.

Ces observations établissent une différence radicale entre le travail consommé par suite du frottement médiat, proprement dit, ou autrement, par suite de l'effort qu'il faut pour faire glisser deux surfaces séparées par une couche d'enduit, et le travail résultant de l'usure, de la désagrégation de la matière pondérable¹. Nous devons en conclure aussi que le frottement médiat ne suppose pas nécessairement une usure continue des surfaces frottantes, ainsi que le pensent beaucoup de personnes. Si nos coussinets, nos tourillons, etc., s'usent à la longue, c'est par suite des impuretés qui, se mêlant à l'huile, *mordent* dans les deux métaux, et d'autant plus que ceux-ci sont moins durs : ce n'est point ici le frottement proprement dit qui est la cause de l'usure. — La cause du développement de calorique n'est donc nullement la même quand il y a rupture et désagrégation, ou quand il y a simple glissement.

¹ Voyez la note qui suit ce mémoire.

D'importantes conclusions, toutes pratiques, peuvent se tirer de notre loi générale, en apparence purement scientifique.

1° Commençons par une application, qui n'a d'abord l'air que d'une question de simple curiosité. Voyons ce que les frottements (tous médiats et presque tous bronze sur fer) développent de calorique dans une filature de coton, par exemple : c'est le genre d'usine où la force perdue en frottement dépasse le plus celle qui est utilisée à travailler la *matière à ouvrir*, et si nous comptons cette dernière pour le quart de la force totale, nous lui ferons une large part. Supposons que la force totale consommée soit telle que nous ayons 400 chevaux, soit 7500 kil. *m*", en frottement. Puisque 370 kil. *m* de travail nous donnent 1 calorie, il s'ensuit que nous aurons par seconde $\frac{7500}{370} = 20$ calories environ ; la journée d'ouvrage de 12 heures ayant 43200 secondes, nous aurons en un jour produit $20 \times 43200 = 864000$ calories. Comme 1 kil. de houille, dans les conditions ordinaires, donne à peu près 3200 calories, il s'ensuit que la chaleur développée par le frottement équivaut à $\frac{864000}{3200} = 270$ kil. de houille. C'est donc là la quantité de ce combustible qu'il faudrait, dans les saisons froides, brûler de plus pour maintenir l'établissement à la même température, si le frottement ne donnait aucune chaleur. Un calcul, trop simple pour être fait ici, nous apprend bientôt que c'est là un calorique acheté bien cher. Toujours est-il que, puisqu'il se produit, il faut du moins voir s'il n'aurait pas d'autres avantages, et c'est ce que nous allons reconnaître à l'instant.

2° Nous avons vu que toute graisse allège d'autant plus le frottement, que les pièces en mouvement sont portées à une température plus élevée (pourvu qu'elle ne le soit pas assez pour altérer la matière lubrifiante) ; d'un autre côté, nous voyons que le frottement médiateur est une source de chaleur d'autant plus abondante qu'il absorbe plus de force en un temps donné : toutes les pièces frottantes d'une usine quelconque doivent donc prendre une température supérieure à celle du milieu ambiant. Cette température

dépend, comme on le conçoit, d'une multitude de circonstances qui influent sur la déperdition continue du calorique produit; et le point où il y a équilibre entre la déperdition et la production, variera presque à l'infini, selon la nature des machines. Mais toujours est-il que le frottement porte ainsi en lui-même une cause qui tend partout à le diminuer jusqu'à un certain point. Voyons maintenant comment intervient ici la combinaison de nos deux lois calorifiques. Un exemple numérique sera plus aisément compris. Je vois (tableau E, expériences I et II, colonnes *p*), qu'à vitesses égales, l'huile à 50° exigeait à très-peu près la même charge 0,62 kil. que le spermacéti à 36° : serait-il possible, par hasard, qu'une pièce quelconque de nos machines se maintînt à 50° étant graissée à l'olive, et à 36° étant graissée au spermacéti? Dans ce cas, le travail développé étant évidemment le même de part et d'autre, puisque la vitesse et la charge sont les mêmes, nous aurions un avantage manifeste à substituer l'olive au spermacéti, puisque celui-ci coûte presque le double. Que faudrait-il pour qu'il pût en arriver ainsi? Toutes choses égales d'ailleurs, un corps perd d'autant plus de calorique en un temps donné, qu'il est plus chaud que le milieu ambiant : pour que l'olive pût se maintenir à 50°, tandis que le spermacéti se maintient à 36°, il faudrait donc qu'à travail mécanique égal, elle développât beaucoup plus de calorique que celui-ci; il faudrait, en un mot, que le calorique produit fût quelque chose qui dépendît spécifiquement de l'espèce d'huile. Or, notre seconde loi nous apprend qu'il n'en est pas ainsi et que le calorique est seulement proportionné à la dépense de travail : notre pièce frottante ne pourra donc jamais atteindre 50° avec l'olive, si, étant graissée au spermacéti, elle se tient à 36°; et ne pouvant atteindre cette température, elle marchera toujours et nécessairement plus lourd avec l'olive qu'avec le spermacéti.

Les conclusions pratiques de tout ce qui précède sont : 1° qu'en raison du calorique qu'elles développent, toutes les huiles tendent dans nos usines à se bonifier par suite du travail, et que les mauvaises sont en ce sens plus favorisées que les bonnes. Le calorique

développé par le frottement, par la présence des ouvriers dans les salles, par la lumière solaire, etc., est donc précieux, puisqu'il nous procure une économie de force motrice très-notable. Tous nos seigneurs de pompes ou de moteurs hydrauliques savent que plus la journée de travail avance, plus en général leurs moteurs s'allègent : nous avons la clef de cet allègement. 2° Mais qu'en vertu de nos deux lois calorifiques combinées, il est impossible que deux huiles qui diffèrent entre elles pour le frottement, à une même température, arrivent jamais à s'équivaloir par suite du calorique qu'elles développent. Lors donc qu'un ouvrier nous avertit qu'un coussinet, qu'une platebande, etc., chauffe plus avec une huile qu'avec une autre, nous pouvons hardiment conclure qu'en toutes circonstances la dernière sera meilleure : le thermomètre serait ici une épreuve aussi décisive que le meilleur dynamomètre, si l'on ne voulait arriver qu'à une approximation. Sans la combinaison naturelle de nos deux lois dans les phénomènes, nous ne pourrions plus arriver à aucune méthode générale pour apprécier les huiles : l'une pourrait convenir pour telle pièce, l'autre pour telle pièce, et pour arriver à un minimum de force dans une usine, il nous faudrait autant d'espèces d'huiles qu'il y a d'espèces de pièces frottantes. 3° Enfin, nous voyons aussi qu'en mécanique pratique nous aurions tout intérêt à entourer, partout où cela est possible, les pièces lubrifiées, avec des corps mauvais conducteurs, avec du bois, etc. C'est un conseil naturel et simple que l'on trouvera probablement un avantage marqué à suivre.

§ IV. Passons maintenant des questions physiques qui sont en relation intime avec l'étude du frottement médiat, aux questions de mécanique générale qui, elles aussi, reposent sur cette étude, et sans la connaissance desquelles il nous serait bien difficile, dans la pratique, de comparer exactement deux huiles.

L'une des toutes premières remarques que j'avais faites en me servant de la balance de frottement, c'est que bien rarement le fléau restait cinq minutes de suite en équilibre parfait, et la plupart du temps, même pour des intervalles beaucoup plus courts,

la charge à mettre sur le plateau variait sensiblement. Il m'importait donc de trouver la cause de ces variations, afin de les prévenir, s'il était possible, pour arriver à des pesées plus justes. Si, déjà, les conclusions, auxquelles m'avait conduit une longue série d'expériences antérieures et faisant partie d'un travail que je n'ai pu publier encore, ne m'avaient permis de présumer la raison de ces inégalités apparentes dans la valeur du frottement, j'y serais promptement parvenu à l'aide des remarques suivantes. Les variations étaient beaucoup plus grandes quand le mouvement du tambour T dérivait des pompes à vapeur, que quand il partait du moteur hydraulique seul; et plus les pompes étaient chargées, plus ces variations s'accroissaient : il y avait donc une connexion évidente entre elles et les vitesses du manège, et il ne me restait qu'à me mettre en mesure d'être maître de ce dernier élément, afin d'en étudier l'influence. C'est ce que l'emploi de deux cônes parallèles, se commandant par courroie, et de l'indicateur précis de vitesse (fig. 3), me permit de faire aisément.

L'expérience I relatée sur le tableau E a été faite, comme on voit, avec deux vitesses, 92 et 51 tours par minute. En raison de cette différence, on remarque qu'à toutes les températures, de 60° à 25°, la charge répondant à 92 tours dépasse celle qui répond à 51; leur rapport varie peu et est en moyenne comme 100 : 62 ou 0,62. L'expérience III relatée sur le tableau F, faite avec différentes huiles, prolongée à une même température 40°, et exécutée avec la plus minutieuse attention, donne le même rapport environ (0,64). Une foule d'autres expériences, faites avec plusieurs autres vitesses et dans des conditions très-variées, m'ont conduit au même résultat, pourvu que, pour chaque changement de vitesse, j'aie eu soin de maintenir la température constante : toujours la charge faisant équilibre au frottement était en dépendance directe avec les vitesses. Il est donc impossible d'admettre encore, comme on l'a fait jusqu'ici (plutôt il est vrai en théorie qu'en application), que le frottement médiateur est indépendant de la vitesse relative des surfaces en regard.

On sait que pour trouver, empiriquement et à l'aide de nombres brisés fournis par l'expérience, la loi qui préside à un phénomène, il faut au moins trois de ces nombres expérimentaux ; et que plus on possède de ces données de l'expérience, plus la loi qu'on en déduit prend le caractère d'une loi naturelle et fondée sur l'essence même du phénomène. Je ne me permettrais donc pas d'induire quoique ce soit des chiffres que j'ai indiqués ci-dessus, si, à l'aide de la balance de frottement, je n'avais essayé les charges répondant à un grand nombre de vitesses différentes, et surtout si les expériences antérieures dont j'ai parlé ne m'avaient, à travers une grande variété de méthodes expérimentales, conduit à la même conclusion, ou, pour mieux dire, *aux mêmes conclusions* ; car, comme on va voir, la relation existant entre la vitesse et la valeur du frottement, ne peut pas s'énoncer en une seule loi simple et générale.

1° Lorsque les deux surfaces en regard sont abondamment lubrifiées avec une graisse de bonne qualité et suffisamment visqueuse, lorsque la pression qui les maintient en regard n'est pas tellement forte qu'elle puisse expulser l'huile, lorsqu'enfin on opère avec une suite de vitesses qui ne soient pas telles qu'on ne puisse plus maintenir la température toujours et partout constante :

« Les charges faisant équilibre au frottement sont à très-peu
« près proportionnelles aux vitesses, c'est-à-dire que pour des vi-
« tesses 1, 2, 3, 4, etc., il faut des charges une, double, triple,
« quadruple, etc. »

2° Lorsque les deux surfaces en regard sont très-peu lubrifiées ou marchent depuis très-longtemps avec une même ration de graisse, ou bien lorsque la fluidité de l'huile est par trop grande, de telle sorte qu'il y en a beaucoup moins qui reste interposée avec une faible vitesse qu'avec une grande, ou bien encore lorsque la pression est d'une énergie disproportionnée avec l'étendue des surfaces frottantes, les températures étant toujours constantes :

« Les charges faisant équilibre au frottement sont proportion-
« nelles aux vitesses élevées à une certaine puissance désormais

« inférieure à l'unité, et s'approchant d'autant plus de la racine
« quarrée de ces vitesses que les circonstances susmentionnées
« deviennent plus défavorables. »

3° Lorsque la matière est excessivement fluide et presque complètement dénuée de viscosité (tel est le cas de l'eau, de l'air, etc.), l'influence de la vitesse, quoique toujours marquée, est cependant beaucoup moindre qu'avec les graisses qui peuvent réellement s'employer comme lubrifiant, et cette influence devient excessivement difficile à apprécier. A mesure que la vitesse diminue, la quantité de lubrifiant entraînée sous le coussinet diminue aussi; les deux surfaces en regard se rapprochent et leur action réciproque grandit; il est donc impossible d'avoir, dans ce cas, une lubrification régulière et les résultats ne peuvent plus l'être non plus.

4° Lorsque les deux surfaces marchent à sec, et qu'en raison d'une pression suffisante l'air ne peut plus intervenir; lorsque, en un mot, le frottement est immédiat :

« L'influence de la vitesse est complètement nulle sur les char-
« ges nécessaires pour faire équilibre à ce frottement. »

5° Enfin, lorsque l'on n'a point égard aux températures et que les surfaces sont dans un état de lubrification moyenne, et telles sont les conditions du frottement médiat pour les pièces frottantes de nos usines, considérées dans leur ensemble, on ne commet pas d'erreur notable en partant de ce principe, que dans ce cas général :

« Le frottement médiat est proportionnel aux racines carrées
« des vitesses; de telle sorte que des vitesses qui seront entre elles
« comme les nombres 1, 4, 9, 16, etc., produiront un frottement
« dont les valeurs seront 1, 2, 3, 4, etc. »

De ces différentes propositions découlent d'importantes déductions générales.

1° Nous voyons qu'il existe une différence radicale entre les frottements de deux surfaces appuyées directement l'une sur l'autre ou séparées par une couche de matière lubrifiante : la vitesse

relative influe sur le second et nullement sur le premier. Cette différence suffit pour légitimer les dénominations de frottement immédiat et de frottements médiats, que j'ai employées pour distinguer ces deux genres de phénomènes.

2° Nous voyons que, dans l'emploi de la balance de frottement ou de *tout autre appareil équivalent*, il serait impossible d'arriver à des résultats absolus ou même seulement comparatifs, si l'on ne tenait un compte rigoureux des vitesses.

3° Nous voyons, enfin, à un point de vue plus élevé et général, combien sont difficiles toutes les expériences sur le frottement médiat; nous voyons de quelle foule de circonstances nous sommes sans cesse obligés de tenir compte : températures de l'air ambiant et des surfaces en regard, vitesses relatives, nature de la matière lubrifiante et des deux corps solides, état des surfaces de ceux-ci, etc., etc.; tout, en un mot, intervient ici. La moindre des circonstances, si nous la négligeons, nous empêche de trouver les lois qui président à tout l'ensemble, et nous expose à nous heurter contre des anomalies qui, de fait, ne sont qu'apparentes, et qui, cependant, sont inexplicables lorsque nous n'embrassons pas tout cet ensemble dans un même coup d'œil sans cesse attentif. Je ne citerai ici que deux exemples des plus frappants : l'un va être compris à l'instant par tout le monde, l'autre exige l'emploi des signes algébriques, mais il est trop important pour être omis; je le donne donc en note, me bornant ici à en indiquer les résultats et le sens général¹.

¹ Nous avons vu que si à 0° l'effort du frottement ou la charge du plateau de balance est P , il devient $p = P : 1,0422^t$ à une température quelconque t . Cette charge P répond à un nombre de tours N : si le frottement est proportionnel aux vitesses, nous aurons donc pour un nombre de tours quelconque n et une température t : $p = P \frac{n}{N} : 1,0422^t$. En résolvant cette équation par rapport à t , on a : $t = \left(\log. \frac{Pn}{Np} \right) : \log. 1,0492$, (A). Supposons de suite que nous opérons avec de l'huile d'olive, nous avons ici $P = 12$ k. et $N = 92$. D'où $t = \log. \left(\frac{12}{92} \cdot \frac{n}{p} \right) : \log. 1,0492 = (-0,88461 + \log. \frac{n}{p}) : 0,0208889$ (A'). D'un autre côté nous savons que, désignant par e l'espace

4° Supposons que nous expérimentions avec la balance de frottement, ou tout autre appareil du même genre, pour étudier l'influence des changements de vitesse; supposons l'huile lubrifiante

et p la charge, nous produisons pe 0,0027 calories par suite du frottement. Pour notre balance de frottement, nous avons $e = 3^m,52 n$; sa loi de refroidissement était $q = 0,0556 (t - G)$, q désignant le nombre de calories perdues par minute, t la température de l'appareil et G celle de l'air. Comme nous supposons dans le texte que l'expérience durait assez pour que l'instrument acquit une température stable, nous avons égalité entre le calorique produit et celui qui se perd, d'où il résulte : $0,0027 \cdot 3^m,52 np \text{ kil.} = 0,0556 (t - G)$. En remplaçant donc ici t par sa valeur (A'), nous aurons la relation qui existera entre p et n , l'instrument étant libre de prendre sa température maxima. On a ainsi, toute réduction faite : $0,003597 pn = - 0,88461 + \log n - \log p - G \cdot 0,0209$.

Ce genre d'équation ne peut se résoudre comme on sait que par tâtonnement. Supposons d'abord $n = 50$ tours par min. et $G = 20^\circ$ pour l'air ambiant : nous trouvons que la valeur de p convenable est 1 kil. 85. Supposons ensuite $n = 100$ t., mais au lieu de chercher encore la valeur de p qui répond à ce nombre de tours, laissons $p = 1$ kil. 85 et voyons quel changement il faudrait qu'éprouvât la température G pour pouvoir maintenir p . Nous avons $0,003597 \cdot 100 \cdot 1,85 = - 0,88461 + \log. 100 - \log. 1,85 - G \cdot 0,021$,

On trouve ainsi aisément $G = 9^\circ,3^\circ$: c'est à dire que par suite du passage de n de 50 à 100 tours, il faudrait que la température de l'air baissât de 11° pour qu'il fût possible de trouver que la charge ne varie pas. Et il est bien évident que si G . ne baissait pas, on trouverait qu'en dépit de la loi $p \propto v$, la charge p aurait baissé, au lieu de s'être accrue.

Il sera bien clair maintenant pour chacun que si les charges, à températures constantes, au lieu de croître comme les vitesses mêmes, procèdent suivant une puissance inférieure à l'unité, l'effet d'un changement de vitesse donnera lieu à une plus grande illusion encore, lorsqu'on laissera la température s'élever librement : à moins toutefois que, par suite d'une disposition particulière de l'appareil d'essai, la loi de refroidissement ne diminue elle-même de rapidité, avec les vitesses.

Que l'on ne pense pas qu'il s'agisse ici de pures supputations théoriques, voici des chiffres :

Le tambour T, baignant dans de l'huile et faisant 90 t., la charge devenue constante au bout de 3 heures de marche, était 1 kil. 15. La température de l'appareil était alors $43^\circ,5$ et celle de la chambre $22^\circ,5$.

Dans les mêmes conditions, mais avec 50 tours seulement par minute,

très-fluide, et la pression, qui maintient les surfaces en regard, très-forte. Si, en faisant décroître successivement la vitesse, nous opérons assez vite pour que la température ne se modifie pas grandement, ou si nous tenons celle-ci constante, nous verrons les

au bout de quelques heures encore la charge devint constante et égale à 1 kil. 07. La température de l'appareil était tombée à 33°, celle de la chambre étant 21°,5. Ainsi donc, il y avait presque identité de charge à 90 t. et à 50 t. Il nous est cependant facile ici de démêler l'effet du changement de vitesse. Si la température, au lieu de tomber à 35°, avait été maintenue à 43°,5, la charge, comme nous l'apprend la loi $\frac{AP}{1,0492 t} = p$, eût été $p = 1$ kil. 07. $\frac{1,0492^{33}}{1,0492^{43,5}} = 0$ kil. 645. Le rapport des vitesses étant $\frac{50}{90} = 0,555$, nous avons donc : $= 0,555^x = 0,645$ d'où $x = \frac{\log. 858}{\log. 0,45} = 0,92$; c'est à dire que la relation entre les vitesses et les charges étaient pour ce cas particulier : $p = A v^{0,92}$. Cet exposant est très-sensiblement inférieur à l'unité ; d'après mes raisonnements ci-dessus, la charge aurait donc dû croître à mesure que la vitesse diminuait, lorsqu'on laissait l'appareil prendre sa température maxima. Voyons pourquoi il n'en a pas été ainsi. Pour la vitesse de 90 t., nous produisons $q = 90. 3^m,52. 1,15. 0,0027 = 0,993$ calorie par minute. La température de l'appareil était 43°,5, celle de la chambre 22°,5. il se perdait donc $V (43,5 - 22,5)$ par minute, V étant le refroidissement à 1° de différence. On a donc $0,993 = V 21°$ d'où $V = 0,0473$. Pour la vitesse 50, on avait de même $50. 3,52. 1,07. 0,0027 = V (33° - 21°,5)$ d'où $V = 0,0442$. Ainsi la vitesse de refroidissement s'était abaissée et l'appareil ne perdait plus autant de calorique (pour une même différence entre sa température et celle de l'air), il se maintenait à une température plus élevée. Le poids répondant à 50 t. se trouvait donc diminué par cette raison.

Je me suis à dessein étendu sur cette expérience. On voit à quelles erreurs on est sans cesse exposé dans ce genre de recherches, lorsqu'on ne se préoccupe pas continuellement des moindres altérations des conditions où l'on opère. Dans mes expériences sur le calorique dégagé par le frottement, le bas du tambour était complètement libre et son intérieur contenait une grande masse d'eau ; son refroidissement pour 1° de différence entre C et G était à très-peu près constant pour toutes les vitesses et égal à 0,0556. Dans l'expérience que je viens de citer, le tambour (d'ailleurs vide d'eau) plongeait par le bas dans l'huile ; le mouvement plus ou moins accéléré de l'appareil battait cette huile, plus ou moins, avec l'air ambiant. Et ces seules modifications ont suffi d'abord pour abaisser de beaucoup la valeur de V (puisque le tambour était protégé par le bas) et pour la rendre fortement variable avec les vitesses mêmes du tambour.

charges décroître aussi pendant un certain temps presque proportionnellement aux vitesses. Mais il arrivera un moment où elles cesseront de baisser : et puis, tout d'un coup, elles commenceront à croître très-fortement, et dépasseront considérablement la valeur qu'elles avaient pour les plus grandes vitesses. Nous trouvons-nous en présence d'une anomalie, ou bien d'un phénomène nouveau qui prouverait qu'en deçà et au delà de certaines limites la diminution de la vitesse aurait un effet diamétralement opposé ? Non, assurément : tout ce que nous voyons est très-naturel et nous eussions pu le prévoir par le seul raisonnement. L'huile étant excessivement fluide et la pression très-forte, il arrive un moment où la vitesse ne suffit plus pour entraîner la matière lubrifiante sous les deux surfaces frottantes : celles-ci se rapprochent de plus en plus, et le frottement finit par devenir immédiat. Or, nous savons que la valeur de celui-ci est toujours incomparablement supérieure à celle du frottement médiat, si mauvaise que nous supposions la matière lubrifiante.

2° Supposons que, voulant avec la balance de frottement étudier, comme précédemment, l'influence des vitesses, nous ignorions l'influence des températures sur la valeur du frottement médiat ; supposons que, pour chaque vitesse, nous opérions assez longtemps pour que l'appareil ait le temps d'arriver à sa température maxima, que nous ne mesurons pas et dont nous ne nous occupons pas. Que va-t-il se passer ? Pour une certaine vitesse que je prends pour unité, il va se dégager par minute une certaine quantité de calorique que je prends aussi pour unité. Doublons ensuite la vitesse ; en vertu de notre loi de proportionnalité, la charge, *dans le premier instant*, va doubler aussi. Mais, à charge égale et par le seul fait de la duplication de vitesse, il se dégagerait, par minute, une quantité de calorique double, puisque le travail, rapporté au temps, a doublé. La température de notre appareil va donc rapidement augmenter, afin que les pertes par les parois puissent redevenir égales à ce qui se produit à chaque instant en calorique ; or, par suite de cette élévation de température,

notre charge, *d'abord doublée par l'effet de la vitesse*, va diminuer. Le résultat final de notre pesée dépend donc, comme on le voit, de la combinaison de deux lois contraires : l'une, celle des vitesses, qui augmente la charge ; l'autre, celle des températures, qui diminue cette charge. Par suite de cette combinaison, il pourra donc arriver que la charge ne varie pas : dans l'exemple que j'ai développé en note, il se trouve que non seulement, pour le cas particulier de notre balance, la charge n'augmente pas pour une vitesse double, *mais même qu'elle diminue*.

En définitive, et pour parler maintenant d'une manière beaucoup plus générale, nous voyons que la relation que nous trouvons entre la valeur du frottement et la vitesse dépend uniquement de la loi particulière de refroidissement de l'appareil que nous employons. Si celui-ci est construit de manière à ce que le calorique soit obligé de s'y accumuler fortement avant qu'il n'y ait équilibre entre la production et la déperdition, on sera faussement induit à croire que la charge diminue à mesure que la vitesse s'accroît : et c'est là le cas de la plupart des instruments *ad hoc* que l'on a employés jusqu'ici dans l'étude des frottements. Si l'appareil est construit de manière à perdre très-rapidement le calorique produit, nous trouverons au contraire une action très-marquée de la grandeur de la vitesse sur celle des charges. Telle sera en pratique le cas de la plupart des machines de nos usines ; les lourdes pièces mouvantes sont ici nécessairement commandées par des arbres très-massifs aussi, où le calorique se communique de proche en proche pour se disperser ensuite dans l'air ambiant ; les pièces légères, presque toujours supportées *par d'autres pièces métalliques*, ne s'échauffent pas non plus fortement (par les mêmes raisons) ; l'agitation violente de l'air qu'occasionne le mouvement de certaines parties (telles sont les broches de filature avec le va et vient de leur chariot), est encore une cause d'égalisation rapide de température. On conçoit par suite comment j'ai pu affirmer que, dans nos machines, le frottement est à très-peu près proportionnel aux racines carrées des vitesses.

Ces différentes considérations, sur lesquelles j'ai cru devoir m'étendre, me semblent expliquer très-clairement comment plusieurs observateurs et savants éminents ont été amenés à penser que la vitesse est sans influence sensible sur la valeur du frottement, et à poser un principe qui, si je puis m'exprimer ainsi, est en opposition avec *l'instinct* des personnes qui en quelque sorte vivent au milieu des machines. Et, ce que je dis ici relativement aux vitesses, s'applique *a fortiori* à la question des surfaces de frottement, dont je vais brièvement parler dans le paragraphe suivant.

§ V. La balance de frottement n'est, ainsi que je l'ai dit, pas à beaucoup près le seul instrument dont je me sois servi pour l'étude du frottement en général, et pour celle des matières lubrifiantes en particulier : il serait fastidieux de dire ici toutes les formes diverses que j'ai successivement essayées. Le fait saillant qui m'a toujours frappé, c'est que, quelque soin que je prisse à employer toujours les mêmes matières lubrifiantes et frottantes, avec quelque attention que j'aie surveillé le polissage des deux surfaces métalliques en regard, il m'a été impossible, toutes circonstances égales, d'arriver à un même coefficient de frottement. Je ne pus attribuer ce fait qu'à ce que je ne faisais nulle attention d'abord à la valeur absolue des surfaces en regard : les expériences *ad hoc* que je fis, confirmèrent pleinement cette induction, de même que celles dont le hasard me fournit l'occasion de constater les résultats, sans les avoir provoquées. Le tableau F (expériences au dynamomètre) en présente une qui est à ranger dans cette dernière catégorie.

Comme, pour l'essai des huiles, chaque observateur peut se servir toujours du même instrument, et arriver ainsi à des résultats comparatifs, sans avoir égard à la valeur absolue du frottement pour telle ou telle surface ; ce serait sortir complètement de mon sujet que de m'arrêter sur ce nouvel élément d'incertitude. Je me bornerai à dire que la conclusion, *applicable à la pratique*, où j'ai été conduit, c'est que, *toutes choses parfaitement identiques d'ailleurs* :

« La valeur du frottement médiat est très-sensiblement proportionnelle à la racine carrée des surfaces et à celles des pressions, selon que l'on fait varier l'un ou l'autre de ces éléments, ou tous deux à la fois. »

Comme on le voit, cette proposition est en contradiction formelle avec le principe généralement admis jusqu'ici (du moins dans les calculs sur le frottement), d'après lequel la valeur absolue du frottement serait indépendante des surfaces, et simplement proportionnelle aux vitesses. Les considérations générales que j'ai présentées plus haut rendent parfaitement compte de cette différence, car les mêmes circonstances qui troublent et font en quelque sorte disparaître l'action de la vitesse, interviennent ici, et masquent complètement l'action des surfaces, si l'on n'est prévenu de leur influence.

Je termine ici la partie purement scientifique de mon travail par quelques réflexions sur la méthode même que j'ai suivie dans mon exposition.

Ayant à rendre compte des recherches que j'ai faites pour arriver à un procédé sûr d'apprécier la valeur mécanique des huiles de graissage, j'ai dû, en premier lieu, indiquer tout ce qui peut troubler, ou même fausser les résultats qu'on obtient dans de tels essais : j'ai dû, en un mot, en indiquer les *éléments perturbateurs*, afin d'éviter à d'autres observateurs d'inutiles tâtonnements, et de les prémunir contre les difficultés qu'ils rencontrent. Je crois être entré dans des détails suffisants pour tout ce qui est relatif au rôle important que joue le calorique dans le frottement médiat ; et le lecteur, en suivant mon exposé, en aura pu devancer les conclusions. De crainte d'excéder les bornes de mon sujet, j'ai dû être plus concis pour ce qui concerne l'influence des vitesses, des surfaces et des pressions : l'expérimentateur qui veut comparer deux huiles est toujours le maître de rester sous ces trois rapports dans les mêmes conditions, et d'arriver ainsi à des résultats comparables. Il me suffisait donc d'avertir simplement de la réalité de cette influence et de montrer, à l'aide de quelques tableaux numé-

riques, qu'il est nécessaire d'en tenir compte. Mes chiffres, ainsi que je l'ai dit, ne peuvent pas mener à la découverte des lois qui président à cette triple influence. J'aurais cru toutefois laisser une lacune dans mon travail si je n'avais exposé ces lois, telles que me les ont fait connaître les expériences que le manque d'espace d'une part, et la nature de mon sujet d'autre part, m'ont empêché de présenter in extenso. Quelqu'insolite que soit en ce sens l'énoncé purement affirmatif que je donne de ces lois, on m'en saura gré, je l'espère, et on m'en pardonnera la forme. J'ai voulu être utile aux personnes qui ont tous les jours à s'occuper de calcul sur les frottements et la force des machines, et les mettre à même de mieux se rendre compte de ce qui se passe réellement dans la pratique; j'ai pensé aussi faire plaisir au lecteur en donnant sommairement les résultats principaux d'un travail, que depuis plusieurs années je n'ai pas un instant perdu de vue et que tous les jours je cherche à rendre plus complet, avant de le publier.

DEUXIÈME PARTIE.

Réflexions générales sur la difficulté que présente l'exécution d'un instrument spécial destiné à l'essai des huiles.

Je viens de présenter les résultats d'une longue série d'expériences qui toutes supposent un très-haut degré de précision de la part de l'instrument qui a servi à les exécuter. On pourrait s'attendre par suite à ce que le même appareil pût servir avec la plus grande facilité à l'épreuve de la valeur relative et mécanique des huiles, et à ce que j'insistasse fortement pour en conseiller l'emploi. Le lecteur aura donc lieu d'être surpris si, très-loin de là, je me livre ici à une critique sévère de cet instrument, et si j'étends cette critique à tous les appareils isolés et spéciaux qui repo-

sent nécessairement sur les mêmes principes essentiels. Rien cependant ne paraîtra plus fondé que cette critique.

Il ne s'agit plus, en effet, pour nous maintenant d'arriver à des résultats scientifiques qui concernent tout l'ensemble des lois du frottement, mais bien de nous occuper de la recherche de bons moyens pratiques, à la portée des personnes qui ne veulent pas consacrer beaucoup de temps à des essais, et qui cependant tiennent à avoir des données justes pour le choix qu'elles ont à faire parmi les huiles.

La balance de frottement que j'ai décrite a tous les caractères d'un instrument de précision et de cabinet. Elle en a aussi toutes les exigences, et en offre tous les ennuis à celui qui, avant tout, tient à arriver vite à un résultat. Elle nécessite une foule d'attentions et d'observations accessoires, sans lesquelles il est absolument impossible de rien conclure de ces indications.

Voyons, en effet, de quelles manières nous pouvons nous en servir pour la comparaison des huiles, et quelle est celle que nous devons choisir.

1° Nous pouvons opérer en laissant baigner dans l'huile le bas du Tambour T, afin que la quantité de lubrifiant ne varie pas du tout pendant le cours d'une opération. Et puis en même temps :

- 1) Ou bien maintenir la température de l'appareil constante à l'aide d'eau froide qu'on fait passer par le tambour, et peser quand la charge ne varie plus.
- 2) Ou bien laisser l'appareil s'échauffer et atteindre la température maxima où les pertes par les parois sont devenues égales à la quantité de calorique produite à chaque instant. On ne pèse alors que quand ce maximum est atteint.

2° Nous pouvons nous borner à ne faire baigner le tambour qu'un certain temps nécessaire pour bien laver toutes les traces de l'huile précédente, qui pourraient y rester, puis retirer le bain, et alors laisser marcher.

- 1) Ou en maintenant la température constante et pesant plusieurs fois pendant quelques heures de suite.
- 2) Ou en laissant l'appareil s'échauffer, et ne pesant que quand il a atteint la température maxima due au frottement.

Ces quatre méthodes peuvent être employées à volonté. La première présente des difficultés très-grandes, en ce qui concerne la nécessité de fixer la température : en ce sens, elle ne se recommande nullement au praticien. La seconde donne des résultats d'une régularité et d'une exactitude admirables : quel que soit le nombre d'huiles qu'on essaie, si à la fin des expériences on répète l'essai de l'huile par laquelle on avait commencé, on est sûr de retrouver, à très-peu près, le même chiffre pour la charge. On peut ainsi dresser des tables de comparaison très-fidèles, et ramener, à l'aide de notre loi des températures, tous les nombres à 0°¹.

La troisième méthode présente toutes les difficultés de la première, sans en avoir, à beaucoup près, l'exactitude : comme la quantité de graisse qu'on met, une fois pour toutes, sur le tambour s'y modifie sans cesse, il faut prolonger l'opération assez longtemps, pour avoir une bonne moyenne de pesées, ce qui exige de grands soins à cause de la température qu'on est obligé de maintenir rigoureusement égale.

Enfin, la quatrième méthode s'approche beaucoup de la seconde, quant à l'exactitude ; elle a même sur celle-ci un précieux avantage, c'est de nous faire connaître si une huile est d'une nature plus ou moins siccatrice : car, dans ce cas, la charge, au lieu de rester constante pendant quelques heures (je l'ai vue se soutenir 42 heures de suite avec certaines huiles supérieures), montera, au bout d'un certain temps, et d'autant plus vite que l'huile sera plus facilement résinifiée par l'action de l'air et du frottement.

¹ Soit en effet P la charge qu'on a trouvée pour la température de 40°, la charge à 0° sera $p = P (1,0492)^{40}$; équation que l'on résout en observant qu'on a : $\log. p = 40 \log. 1,0492 + \log. P$.

Nous voici donc conduits à exclure déjà deux de nos méthodes d'expérimentation. Voyons ce que nous pourrons tirer des deux autres, au point de vue pratique de la simple comparaison des huiles, qui est toujours notre but unique.

La première d'abord est, comme je l'ai dit, de la plus haute exactitude, quant à la persistance et à l'identité des résultats qu'elle donne. Mais, au fond, nous voyons qu'elle sort entièrement des conditions ordinaires où se trouvent les frottements dans nos machines : aucune des pièces de celles-ci n'est baignée dans la matière lubrifiante. Et de ce qu'une huile rend bien dans de telles conditions, nous ne serons nullement en droit d'en conclure qu'elle rendra également bien sur nos machines : que dis-je ! nous ne pourrons pas même conclure qu'elle puisse servir. Trop de fois, dans les premiers temps où je m'occupais de ce genre de recherches, j'ai été ainsi complètement induit en erreur. J'ai à dessein cité un exemple frappant en ce sens : c'est celui de l'huile de baleine brute (tableau F, Exp. III) ; on voit qu'elle rendait beaucoup mieux que l'olive, étant jugée comme je viens de dire ; dans son usage pratique (sur les métiers à filer, parexemple), c'était la plus mauvaise des huiles. Voyons maintenant la dernière méthode : celle où nous graissons au commencement de l'expérience et où nous laissons ensuite l'appareil marcher un temps indéfini.

Incontestablement, elle peut mener à des comparaisons justes : mais pour s'en servir convenablement, il faut avoir acquis, s'il m'est permis de m'exprimer ainsi, une grande habitude de l'instrument, en connaître *tous les caprices*, toutes les difficultés de maniement. Les expériences demandent à être prolongées longtemps, car il faut toujours quelques heures pour que la température devienne stable. De plus, il faut nécessairement avoir recours au calcul pour ramener toutes les expériences à une même température supposée. A première vue, on se dira sans doute : la température n'est qu'une conséquence du plus ou moins de mérite d'une huile ; laissons chaque fois l'appareil atteindre le maximum, mais ne nous occupons pas de thermomètre, et relevons simplement les

charges : elles seront sans doute relativement *flattées* pour une mauvaise huile', puisqu'elle chauffe plus, mais en vertu de la combinaison des lois des températures et du développement du calorique, une mauvaise huile (page 206) ne peut jamais s'échauffer jusqu'à valoir autant qu'une bonne huile, et nos nombres s'approcheront beaucoup de ceux que donnerait le frottement dans les machines, puisqu'ici aussi il y a échauffement. Cette suite de raisonnements serait parfaitement juste, s'il ne s'ajoutait, dans notre méthode, un nouvel *élément perturbateur* dont je n'ai pas encore parlé, et dont il nous est difficile de disposer complètement : c'est de la température de l'air ambiant qu'il s'agit. Chacun comprend, en effet, que la température maxima qu'atteint l'appareil varie avec celle de l'air ambiant, et exactement comme elle : une même huile, si l'on ne tient rigoureusement compte des températures, semblera donc chaque jour donner des résultats différents ; deux ou trois degrés d'abaissement ou d'élévation de la température de l'air, abaisseront ou hausseront très-notablement en apparence la valeur du lubrifiant. Et l'on sait qu'à cela près il est impossible de maintenir la température d'un appartement. Bien que le calcul à l'aide duquel, étant connue la charge à une température également connue, on ramène la valeur du frottement à ce qu'elle serait à 0°, bien que ce calcul se fasse très-aisément à l'aide d'une petite table de logarithmes¹, ou même de la règle à calculer, il n'en est pas moins vrai qu'il pourra sembler d'un usage incommodé dans la pratique. Si l'on joint à tout ce qui précède la considération de la peine qu'il faut se donner (sous risque de tomber dans des erreurs grossières), pour maintenir toujours une vitesse constante, pour observer fréquemment des thermomètres qui doivent marquer des 1/10 de degrés, et enfin pour peser chaque fois aussi, afin d'arriver à un résultat constant, on est obligé de con-

¹ Puisque p étant la charge à la température t , il suffit de poser $P = p 1,0492^t$; d'où $\log. P. = \log. p + t \log. 1,0492$ (en supposant que le nombre 1,0492 soit le même pour tous les métaux).

venir que, bien que fort simple, notre quatrième procédé d'observation est encore *fort scientifique* pour les besoins ordinaires des praticiens (voyez d'ailleurs, 3^e partie, les réflexions sur la valeur intrinsèque des observations ainsi faites).

Les considérations critiques que je viens de présenter s'appliquent dans leur entier à tous les instruments spéciaux, sans aucune exception, qu'on a jusqu'ici proposés pour l'essai des huiles, et à tous ceux, sans exception, qu'on essaierait de substituer à la balance de frottement. Tous s'échauffent nécessairement en travaillant; et par l'essence même de leur construction quelle qu'elle soit, ils s'échauffent autrement que les pièces frottantes de nos machines : on est donc obligé de tenir compte de cet échauffement et de faire les corrections qu'il nécessite, si l'on veut des résultats comparables et conformes à ce qui se passe en grand. Tous présentent les mêmes difficultés quant à la manière de les lubrifier : si on les immerge, ils sortent des conditions des machines en général, et ne peuvent rien nous apprendre d'absolu; si l'on ne les graisse qu'une fois en commençant l'expérience, on risque, en tout premier lieu, de ne pas avoir toujours le même degré de lubrification, et l'on est, en tout cas, forcé de laisser marcher très-longtemps avant de rien pouvoir conclure. Ce que je dis ici d'une manière si générale et si tranchée, dérive non-seulement d'une suite de raisonnements dont tout le monde sentira la justesse, mais surtout des expériences que j'ai faites sur un grand nombre d'instruments différents. Le premier, par exemple, que j'ai employé, consistait en une masse cylindrique (20 kilo. environ) en fonte, parfaitement dressée et polie à sa base, et posant sur un plateau de bronze également dressé et poli de manière à porter partout sur la fonte : ce plateau étant mis en mouvement d'une manière régulière, tendait à faire tourner le cylindre de fonte; à l'aide d'un ressort, je mesurais l'effort nécessaire pour le retenir. Je n'entre pas dans d'autres détails; on voit que cet appareil n'était autre que l'éprouvette de Mac-Naught, construite sur une très-grande échelle, et que je ne connaissais pas à cette époque. Par des raisons qu'il ne serait

dire simplement *ce que j'ai fait et pourquoi* je l'ai fait : il sera facile ensuite à chacun de tirer parti de cet exemple unique en le pliant à d'autres nécessités locales.

Ayant le choix parmi les diverses machines d'un tissage, d'un parage et d'une filature de coton, ce fut tout naturellement au Mule-Jenny que je donnai la préférence, pour en mesurer la force consommée par suite de l'emploi de telle ou telle huile. C'est à la fois la machine qui présente le plus de frottements, qui est la plus délicate sous le rapport de la pureté qu'elle exige dans l'huile, et qui entraine pour la plus grande part dans la force entière consommée par l'usine. Le dynamomètre que j'appliquai à ce métier est des plus simples : il consiste en deux roues d'angles parallèles, l'une fixée sur l'arbre moteur du métier, l'autre folle sur cet arbre et commandée par la poulie conductrice ; ces deux roues sont liées par une troisième petite roue d'angle folle sur un levier, dont le point de rotation est l'arbre même du métier sur lequel ce levier peut tourner à frottement doux. Par suite du mouvement de la poulie de commande, ce levier tendait donc à tourner autour de l'arbre ; si on l'obligeait à rester fixe, le mouvement de la première roue d'angle se communiquait à la troisième par l'intermédiaire de la petite roue folle sur le levier : le poids nécessaire pour maintenir celui-ci horizontal indiquait donc l'effort de résistance du métier ; et ce poids multiplié par la vitesse virtuelle du point de suspension donnait la force consommée en kil. mètres¹. Il est inutile de donner d'autres détails sur cet instrument qui peut, sans inconvénient, être modifié de différentes manières. Le métier étant convenablement graissé avec l'huile soumise à l'expérience, on pesait deux ou trois fois par jour, et chaque fois au milieu de l'intervalle de temps qui s'écoulait entre deux levées² : on notait

¹ Voyez d'ailleurs la planche 203, fig. 5 et 6.

² Comme je m'adresse à des industriels, j'ai pensé inutile de substituer une périphrase à ce mot dont le sens sera deviné d'ailleurs des personnes étrangères même à la filature.

les poids pour la sortie du chariot et pour l'arrêt qui achève la torsion (*de la chaîne*), et l'on en prenait la moyenne pour le calcul de la force consommée. Dès les premiers mois de service de ce dynamomètre, on s'aperçut qu'il donnait des indications qui variaient au-delà de toutes limites tolérables ; les changements de température (le lecteur le comprend maintenant aisément), les changements de temps en général, etc., avaient une influence telle qu'elle portait souvent à confondre deux huiles fort inégales en valeur. Pour ne pas être obligé de prolonger chaque essai par trop longtemps (au-delà d'une semaine, par exemple, qui est le temps nécessaire), on établit un dynamomètre au métier *voisin* ; et ce métier désormais fut graissé avec la même huile d'olive : il servait ainsi de type, et c'est le rapport de ses pesées avec celles du voisin qui servait à juger de la valeur relative de l'huile à essayer. J'ai, à dessein, porté sur le tableau F les nombres donnés par ce dynamomètre-type, afin qu'on puisse juger de leurs variations, et, par suite, de l'utilité d'un tel type, ou pour mieux dire, afin qu'on puisse se convaincre qu'un tel type est indispensable.

Telle est maintenant la méthode d'essai qui me semble à la fois la plus pratique et en même temps la plus exacte. Elle ne réclame aucun calcul : car il est parfaitement inutile de connaître la force en kil. mètres", et il suffit de noter et de comparer les poids, qui sont le seul élément variable ; elle ne réclame aucune correction, aucune observation thermométrique, et est à la portée des surveillants ordinaires de l'usine. Elle a sur toute autre l'immense avantage d'indiquer, à une très-petite fraction près, les résultats dynamiques qu'aurait pour toute l'usine l'emploi de telle huile dont elle a aidé à trouver la valeur sur une petite échelle. C'est ainsi, pour spécifier, que lorsque l'on trouvait que la valeur mécanique d'une huile était sur le métier-dynamomètre de $1/10^{\circ}$ supérieure à celle d'une autre, il arrivait toujours que l'établissement entier (consommant près de 200 chevaux), graissé successivement avec les deux huiles, exigeait aussi à peu près $1/10^{\circ}$ d'eau de moins pour marcher dans un cas que dans l'autre.

pas difficile d'énoncer, cet instrument ne pouvait pas, à beaucoup près, avoir l'exactitude et la fidélité de la balance de frottement que je n'ai employée que très-récemment; à l'époque où je m'en servais, j'ignorais encore complètement les phénomènes les plus importants du frottement : aussi fus-je conduit à une suite d'anomalies apparentes sans nombre, qui me le firent rejeter complètement.

D'après ce qui précède, nous voyons qu'il serait inexact de dire que nous manquions d'un bon instrument pour comparer les huiles : nous en possédons, au contraire, plusieurs, et de fort exacts; nous pourrions en imaginer d'autres qui auraient les mêmes qualités. En recourant maintenant aux connaissances que nous avons acquises sur les lois du frottement médiat, nous serons en mesure d'arriver avec eux à des résultats d'une approximation plus que suffisante, pour le but que nous nous proposons. Mais en raison même des précautions minutieuses qu'il faut prendre pour s'en servir, nous voyons qu'aucun d'eux n'a ce qu'on recherche le plus (parfois un peu aux dépens de la vérité), et ce qu'on est convenu d'appeler un *caractère pratique*. Et ceci repose sur l'essence même des phénomènes du frottement, et non sur telle ou telle construction particulière que nous n'avons pas encore su trouver.

TROISIÈME PARTIE.

Je viens de faire une critique des plus sévères des appareils isolés qu'on pourrait employer à l'épreuve de la valeur mécanique des huiles : tout ce qui va suivre en fera mieux encore ressortir la force. Est-ce à dire pour cela qu'on doive maintenant rejeter définitivement tous les instruments connus, et entrer exclusivement dans une autre voie pour atteindre le but? Non, assurément; et pour peu qu'on sache se plier un tant soit peu aux exigences particulières de chaque instrument, on pourra en tirer d'utiles renseignements, de même que de quelques autres épreuves prélimi-

naires dont je parlerai bientôt. Mais voyons d'abord quelle est la meilleure méthode pratique à suivre.

Nous voulons que, par suite de l'emploi de telle huile plutôt que de telle autre, nos usines absorbent en frottements médiats la plus petite force possible; nous voulons donc savoir nous guider dans le choix de cette huile, et savoir aussi si son prix est en harmonie avec sa valeur mécanique. Quoi de plus naturel et de plus exact que de nous adresser directement à l'élément lui-même que nous voulons économiser, et de mesurer la force que consomment nos machines, par suite de l'emploi de telle ou telle huile? Quoi de plus convaincant qu'une expérience qui vous montre directement et sur place le bénéfice obtenu, et qui ne vous place pas dans des conditions autres que celles où se trouvent réellement vos machines? Une fois ceci posé, nous allons voir aisément que nos moyens sont ici limités à deux bien distincts, et nous n'hésiterons pas longtemps sur le choix à faire entre eux: 1° Qu'un établissement marche à l'eau ou à la vapeur, on peut toujours, sans faire aucune expérience scientifique, arriver à se rendre compte approximativement des variations de la force totale consommée: le volume d'eau dépensé par le moteur hydraulique, ou la pression de vapeur nécessaire pour faire marcher la pompe, indiquent suffisamment, par les changements qu'ils éprouvent, l'augmentation ou la diminution de la force qu'ils fournissent; et ces variations de la force sont une conséquence du mérite de l'huile employée, qui est ainsi jugée sur une large échelle. Mais pour recourir à ce procédé, il faut que toute l'usine soit graissée avec l'huile à essayer. Or, il est visible que peu d'industriels consentiront à opérer sur de pareilles bases, et il faut avouer que maintes fois ils auraient lieu de regretter de l'avoir fait. 2° Reste donc à nous tenir à une plus petite échelle, et à mesurer simplement la force constamment absorbée par l'une des machines principales d'une usine, selon qu'elle est graissée avec telle ou telle huile. Au lieu de donner sur ce procédé, à la fois commode et exact, des préceptes généraux qui conduiraient à d'inutiles longueurs, je préfère

Si l'on compare les résultats dynamométriques que j'ai donnés sur le tableau F, avec ceux que j'ai obtenus, pour les mêmes huiles, avec la balance de frottement, on verra qu'à une ou deux anomalies près, tous marchent dans le même sens; c'est-à-dire qu'une huile jugée meilleure qu'une autre à la balance, le sera aussi au métier dynamomètre. Mais les rapports, absolument parlant, sont loin d'être les mêmes; or, ce sont ces rapports exacts qui nous importent, et il est clair que ce sont ceux seuls du dynamomètre qui ont le caractère pratique.

Je vais maintenant présenter, selon leur mérite successivement croissant, les diverses épreuves à faire subir à une huile, avant de la livrer à l'usage d'une usine. Je le ferai sous la forme de préceptes ou d'aphorismes, afin d'être plus concis.

I. On trempera l'index d'une main dans l'huile qu'on veut éprouver, et l'index de l'autre main dans l'huile qu'on prend pour type de comparaison : des deux côtés et de la même manière, on frictionnera l'index contre le pouce. Si l'huile essayée est plus mauvaise que l'huile type, on éprouvera d'abord autour de l'index qu'elle mouille un plus fort sentiment de chaleur, et au frottement, elle sera plus *onctueuse*. Si elle est meilleure, le sentiment de chaleur sera moindre qu'avec l'huile type, et au frottement l'huile paraîtra plus *rude*.

Une huile est d'autant plus mauvaise qu'elle paraît, à cette épreuve, *plus grasse, plus onctueuse*. Une très-bonne huile est nécessairement *très-rude* au frottement. Une huile rude, au contraire, n'est pas nécessairement bonne; c'est-à-dire que ce seul caractère est loin de suffire pour nous permettre d'affirmer sa supériorité. Le caractère opposé est, au contraire, suffisant pour nous permettre d'affirmer l'infériorité de l'huile. Au moyen de quelques exercices comparatifs, on arrive ainsi promptement à un tact qui ne trompe plus en ce sens; cette épreuve est donc un premier jalon fort utile.

II. En versant successivement un même poids de différentes huiles dans un vase convenable, percé d'un petit trou à sa partie

inférieure, et comparant, à l'aide d'une montre à secondes, le temps qu'il faut à chacune pour s'écouler, on aura le rapport de leur fluidité relative. Cela posé :

La meilleure huile sera toujours la plus fluide, et la plus mauvaise sera la moins fluide; mais ici encore, il n'y a que la seconde affirmation qui soit décisive. De ce qu'une huile est très-fluide, il ne s'ensuit pas nécessairement qu'elle soit très-bonne; cependant ce caractère devient décisif, lorsqu'on opère sur des huiles d'une même et bonne espèce : ainsi, de deux huiles d'olives, ou de deux huiles de spermacéti, la plus fluide sera à coup sûr la meilleure au métier dynamomètre. (Je n'ai pas besoin d'insister sur ce point : l'expérience au *fluidosomètre* doit être faite à des températures rigoureusement constantes.)

III. Après ces deux épreuves préalables, qui nous permettent déjà de rejeter une huile inférieure à l'huile type, on opérera sur la balance de frottement, sur l'éprouvette de Mac-Naught (ou sur tout autre appareil équivalent) ¹. Je conseille ici exclusivement l'emploi de la quatrième méthode (page 220). On graissera une fois

¹ Tous les appareils que l'on pourrait proposer pour l'essai des huiles, doivent nécessairement être construits de manière à faire connaître la valeur du frottement; ils consisteront tous en deux surfaces opposées l'une à l'autre, glissant l'une sur l'autre, et disposées d'ailleurs de telle sorte qu'on connaisse à chaque instant l'effort nécessaire pour produire ce glissement. Les dispositions, les formes générales pourront varier à l'infini : le principe essentiel sera toujours le même. Les mêmes préceptes pour leur emploi s'appliquent donc à tous; et des conseils tout pratiques sur cet emploi sont ici à leur place naturelle.

Lorsque l'instrument qu'on a choisi pour ses expériences sort des mains de l'ouvrier et qu'il a été confectionné aussi bien qu'on peut le faire dans la plupart de nos ateliers, il faut toujours se résigner à lui donner soi-même la dernière main. A l'aide d'huile et d'émeri très-fin à rasoirs, on tâche d'abord de faire porter les surfaces aussi uniformément que possible; puis on sèche, on fait marcher quelque temps et l'on pinceaute à l'émeri les points qui portent le plus. Ce n'est qu'ainsi qu'on arrive peu à peu à une régularité de poli parfaite. Pendant tout ce travail, il faut tenir l'appareil dans les limites de température que l'on ne veut pas dépasser pendant les expériences. Lorsque

pour toutes l'appareil, au commencement de l'expérience; on aura soin que, pour toutes les huiles, il marche à la même vitesse, et reçoive au début la même dose de lubrifiant; on aura soin aussi que l'appartement ait toujours, du moins à 2 ou 3 degrés près, la même température, si l'on veut s'éviter la peine de mesurer la température même de l'appareil. Au bout d'un certain temps plus ou moins long (selon l'espèce d'huile, selon la vitesse, selon la pression, etc.), l'instrument atteint sa température maxima, et la charge étant devenue constante, on en prend note. Si toutes les précautions indiquées ont été observées, les charges minimæ qu'on obtient ainsi pour différentes huiles, donnent déjà une idée juste de leurs qualités mécaniques relatives; mais, comme je l'ai dit, cette comparaison ne répond pas encore assez exactement aux exigences de la pratique. En laissant l'appareil continuer de marcher dans les mêmes conditions, on acquiert ensuite une connaissance précieuse sur la persistance du pouvoir lubrifiant de l'huile essayée; il est bien clair, en effet, que la charge minima se maintiendra d'autant plus longtemps que l'huile sera d'une nature moins siccative, moins résineuse, etc., etc. Une remarque importante est nécessaire ici cependant, et faute de s'y arrêter, on courrait risque de porter souvent un jugement défavorable fort injuste contre une huile (c'est ce qui m'est arrivé fréquemment au début). Dans nos usines, la plupart des pièces sont graissées par

le travail à l'émeri est terminé, il faut laisser marcher avec de l'huile pure, en ayant soin d'essuyer et de renouveler très-fréquemment. Je resterais peut-être au-dessous de la vérité en disant qu'il m'a fallu au moins trois semaines de soins avant de pouvoir me servir de la balance de frottement; et il en avait été ainsi pour tous les autres instruments dont je me suis servi. C'est là sans doute bien de la peine; mais si on la redoute, il faut renoncer à l'usage de tels instruments et à l'étude directe des lois du frottement.

Je n'ai pas besoin de dire que, pendant toutes les expériences, il faut préserver l'appareil de l'atteinte des poussières, des saletés. Et de temps en temps il faut essayer une même huile dans les mêmes conditions, afin de voir si l'état général des surfaces n'a pas varié.

intermittences assez rapprochées (soit à la main, soit mécaniquement); pourvu donc que le pouvoir lubrifiant se soutienne d'un intervalle à l'autre, notre but est atteint : d'obtenir un frottement minimum, pendant tout cet intervalle. Il suffit donc que l'huile soit d'assez bonne qualité (au point de vue chimique), pour que chaque nouveau graissage enlève le peu de cambouis produit, et que celui-ci ne s'accumule pas. En un mot, une huile peut être bien moins persistante qu'une autre sur la balance de frottement, et mériter cependant la préférence : c'est ici à la méthode directe (au dynamomètre) à décider. Pour donner cependant ici une indication pratique, je dirai que lorsque la charge minima ne persistait pas au moins deux ou trois heures sur la balance de frottement, je pouvais, de confiance, rejeter l'huile comme impropre au service. Il suffira à chaque observateur d'étudier son instrument, pour arriver aussi à une mesure semblable assez fidèle.

IV. A côté de l'épreuve à la balance peut se ranger un procédé fort pratique, que j'ai vu employer chez MM. Gros, Odier et Roman, à Wesserling. Quoique je ne l'aie pas essayé moi-même, je me permets de le citer, parce qu'il me semble à la fois commode et passablement concluant. Ayant graissé les tourillons d'un tambour de carte avec l'huile qu'on veut éprouver, on laisse marcher pendant une, deux, trois, heures; puis, à un moment donné, on abat la courroie de commande, et l'on compte le nombre de tours que fait le tambour pour arriver au repos¹. Comme ce sont uniquement la résistance de l'air et le frottement des tourillons qui annihilent peu à peu l'impulsion primitive, et que c'est le frottement qui est ici la *force accélératrice négative* à beaucoup près dominante, on conçoit aisément que le nombre de tours du tambour donne une idée très-approximative du pouvoir lubrifiant de l'huile.

Il est évident que beaucoup de pièces de nos machines pour-

¹ Il est bien évident que, pour cette opération, le tambour doit être dépouillé de coton.

raient être employées de la même manière que ce tambour de carde. Les résultats seront d'autant plus exacts que le moment d'inertie de ces pièces sera plus grand, et que cette espèce de volant improvisé offrira moins de prise à l'air.

V. Lorsque l'huile aura convenablement subi toutes les épreuves précédentes, on la fera enfin passer sur la machine de l'usine que nous avons munie d'un dynamomètre. Comme c'est ici l'expérience décisive, et qu'elle doit durer au moins une semaine, si l'on veut juger toutes les bonnes et mauvaises qualités de l'huile, on conçoit qu'on ne doive y soumettre que l'huile qui en est réellement digne. Et en ce sens, aucune des épreuves mentionnées n'est de trop.

Une question naturelle se présente maintenant d'elle-même : quelle est l'huile à laquelle on devra donner la préférence ? Est-ce toujours et partout celle qui aura le mieux rendu au dynamomètre ? Il est facile de répondre ici en thèse générale.

Pour les pièces lourdes qui tournent très-lentement (tels sont les tourillons des roues hydrauliques, etc.), une huile très-fluide est certainement à méconseiller.

Pour les pièces qui marchent avec une vitesse moyenne ou grande, avec des pressions moyennes ou faibles, c'est à l'huile de la meilleure qualité mécanique qu'on devra s'arrêter.

Le même conseil peut encore être donné quant à nos transmissions de fortes dimensions, du moins lorsqu'on y use de la méthode ordinaire de graissage, qui est à la fois logique et sensée. On sait que l'habitude générale est de placer un morceau de suif (ou autre graisse concrète) dans le chapeau des coussinets, et puis d'alimenter, en outre, ceux-ci d'huile, par intermittences rapprochées, ou d'une manière continue. L'huile ici ne peut pécher par un excès de bonne qualité (et par suite de fluidité), car tant qu'elle lubrifie convenablement, les pièces changent peu de température et il se consomme peu de suif ; qu'au contraire, par une raison ou une autre, l'huile soit momentanément expulsée d'entre les surfaces en regard, à l'instant les pièces vont s'échauffer davantage

et il y affluera plus de suif; en raison de sa plus grande viscosité, il séparera davantage les surfaces, et le frottement diminuera. Pour peu qu'on y réfléchisse, on reconnaîtra aisément que l'espèce d'équilibre qui s'établit ainsi, par suite du mélange spontané de deux graisses, l'une très-fluide, l'autre concrète, est précisément tel qu'on obtient un minimum de frottement. Nous profitons par suite encore ici des bonnes qualités de l'huile employée.

Dans mes tableaux numériques, j'ai cité quelques-unes des matières lubrifiantes que j'ai eu l'occasion d'essayer : je l'ai fait sobrement et bien plutôt afin qu'on puisse juger les procédés d'épreuve, que pour faire ressortir les qualités bonnes ou mauvaises de telle ou telle huile. On comprendra aisément le sentiment qui m'a guidé et l'on m'en saura gré sans doute. Mon intention ne devait être ni de louer ni de critiquer aucun produit en particulier, mais de fournir à chaque industriel consciencieux des moyens de se renseigner, facilement et par lui-même, sur la valeur propre des matières lubrifiantes que le commerce lui offre tous les jours.

Arrivé enfin au terme de ce travail si étendu, j'éprouve encore la crainte d'avoir omis bien des choses, d'avoir laissé bien des lacunes, et de n'avoir par suite pas su satisfaire complètement aux vœux que la Société industrielle m'a fait l'honneur de m'exprimer. D'une part, l'étude des frottements, sous toutes leurs faces, intéresse au plus haut point la philosophie naturelle, car ces phénomènes dépendent directement de la constitution intime de la matière pondérable dans ses rapports avec les forces, avec les fluides impondérables. D'autre part, l'étude pratique d'agents mécaniques dont l'emploi, *judicieux* ou *mal combiné*, peut faire varier de près de 25 % la force consommée par l'industrie, cette étude est d'une haute importance pour l'économie générale d'un pays. Ni l'une ni l'autre de ces études ne sauraient donc recevoir trop d'extension et de développement. Je n'ai ici qu'une crainte à exprimer, c'est d'avoir *semblé* long; je n'ai qu'un désir à émettre, c'est que mon travail ait intéressé le lecteur sans trop fatiguer son attention et puisse maintenant lui devenir utile.

DESCRIPTION DE LA PLANCHE 203.

Figures 1, 2, 3, 4. — BALANCE DE FROTTEMENT.

TT (*fig. 1 et 2*) tambour creux en fonte, parfaitement cylindrique et poli extérieurement, calé sur l'arbre en fer FF, fermé aux deux extrémités : 1° d'une part, par une cloison annulaire en fer-blanc $b'b''b'b''$ (*fig. 2*), terminée par un petit tronc de cône $bb'bb'$, ouvert en bb de manière à laisser un anneau libre entre lui et l'arbre FF; 2° d'autre part, par une cloison identique $a'a'a'a'$ portant un tube cylindrique $a'a''a'a''$, ouvert en trompette en $a''a''$ (*fig. 2*).

EE'E coussinet en bronze (8 cuivre 1 étain) parfaitement ajusté et poli sur le tambour T qu'il embrasse sur la demi-circonférence. Il porte (*fig. 1*) dans son épaisseur une petite ouverture où peut se loger exactement le réservoir du thermomètre CC, divisé sur verre en $1/10^{\circ}$ de degrés. (Diamètre du tambour = $0^m,23$; longueur $0^m,22$.)

LL' levier en chêne ($0^m,08$ d'équarrissage) appuyant sur le coussinet au moyen de petits bras mm' , mm' , vissés aux rebords du coussinet en m' , m' . Ce levier porte à ses extrémités deux équerres en chêne ll' , solidement fixées et munies, à leur partie inférieure, d'un crochet. 1° L'une de ces équerres porte simplement un contrepoids en plomb M', et est pourvue d'une tige longue et légère ff , dont la partie supérieure est parallèle à LL' et dirigée dans le plan de l'axe du tambour; un trait de repère indique quand le levier LL' est horizontal. 2° L'autre équerre porte, à l'aide de corde, le plateau PP sur lequel se trouve une masse de plomb M faisant rigoureusement équilibre à M'. Les deux équerres ll' servent, comme en le comprend, à ramener le centre de gravité de tout le système $ff'M'LE'L'PP$, au-dessous de la ligne horizontale menée par l'axe FF, afin que cette balance à frottement ne fût pas folle. Un pied NN' fixé au sol en N et ouvert en pince en N'N' (*fig. 4*),

sert, comme la figure l'indique clairement, à limiter les oscillations du levier LL'. (Le coussinet, le levier et tous les accessoires, y compris les masses M et M', forment un ensemble pesant 50 kil.) (La distance horizontale de l'axe du tambour à la verticale passant par le point de suspension l' du plateau PP, est 0^m,562.)

Le mouvement du tambour, dans le sens de la flèche *hk* (fig. 1), est accéléré ou ralenti à volonté, à l'aide de deux cônes parallèles liés par une courroie; l'un d'eux recevant son mouvement du moteur, l'autre le communiquant à la poulie H, calée sur l'arbre FF. La vitesse du tambour est indiquée par un petit instrument qui se recommande par sa simplicité et son exactitude : il consiste (fig. 3) en un tube en fer coudé, à deux branches parallèles *xx'*, *x''x'''*, dont l'axe *x''x'''*, portant une poulie à gorge *qq*, tourne verticalement sur le pivot *v* et est maintenue par le haut à l'aide de l'équerre *e e' e''* qu'elle traverse à frottement doux. Cette branche porte un tube de verre mince, scellé en *x'''* et ouvert en *y*; la partie du tube *n'n* est remplie de mercure; la partie *nn''* est pleine d'eau. Lorsque l'appareil tourne, le mercure est poussé plus ou moins dans la branche *n'* par la force centrifuge, et le niveau de l'eau s'abaisse dans le tube *x'''y*. On gradue le tube *x'''y*, en faisant tourner successivement à plusieurs vitesses, qu'on relève directement : ou bien, si les tubes sont assez cylindriques, on calcule la place de toutes les subdivisions, à l'aide de la formule : $h = A n^2 \times$, où *n* indique le nombre de tours par minute, et *h* la distance du niveau de l'eau au point où elle se tenait l'appareil étant arrêté, A étant un nombre trouvé par une seule expérience.

A l'aide d'un petit tuyau introduit par l'anneau *bb* (fig. 2), on peut faire passer par le tambour un courant voulu d'eau froide ou chaude qui, sortant en *a''a''*, tombe dans la petite caisse en bois *rr* où se trouve un thermomètre *tt* et qui est muni, au bas, d'un robinet *z*. Les deux ouvertures *oo* (où pénètre *a*) et *o o'* (où passe l'axe FF) sont aussi justes que possible, de manière cependant à éviter tout frottement du bois contre le tube *aa''* et l'axe FF.

Figures 5 et 6. — DYNAMOMÈTRE.

AA' arbre commandant la machine dont on veut mesurer la force.

R roue d'angle calée sur cet arbre.

R' roue d'angle semblable, folle sur l'arbre et fixée à la poulie de commande p' .

p poulie folle.

C et C' petites roues d'angle engrenant sur R et R' et folles sur le levier LL'.

LL' levier de balance retenu sur l'arbre AA' qui traverse à frottement doux la douille D.

B plateau de balance.

M masse servant à équilibrer le levier, lorsque le dynamomètre marche à vide.

La poulie p' venant à faire tourner la roue R' dans le sens ff' et le levier étant supposé libre, il tournerait autour du centre o en faisant un nombre de tours qui serait précisément la moitié de celui que ferait R'. En désignant par N le nombre de tours de R' par unité de temps et par l la longueur oL' , la vitesse de ce point L' sera donc

$$v = 2\pi l \cdot 1/2 N = \pi l N.$$

Comme en réalité le levier LL' n'est pas libre de tourner et qu'un certain poids P le force à rester horizontal, les petites roues CC' communiquent à R le mouvement de R'.

Le nombre $\pi l N$ devient ainsi la vitesse virtuelle du point de suspension S, et le poids P exprime la tendance de ce point à tourner autour du centre o . Comme ce poids P est précisément nécessaire pour maintenir à sa vitesse normale la machine qu'on essaie, il s'ensuit que la force consommée par cette machine sera donnée par le produit vP et qu'on a, en la désignant par F

$$F = \pi l NP.$$

Pour limiter les oscillations du levier LL', on le fait jouer entre

deux arrêts, dont l'un peut être élevé ou abaissé à l'aide d'une vis, et sert ainsi à empêcher les oscillations pendant l'intervalle d'une expérience à l'autre.

Pour trouver le contrepoids voulu M, on décale la poulie ou roue d'engrenage par laquelle l'arbre A A' met en mouvement la machine qu'on veut essayer, puis on fait tourner R' et on cherche le lest nécessaire en L pour tenir le levier horizontal.



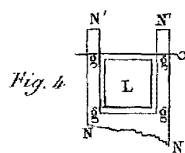
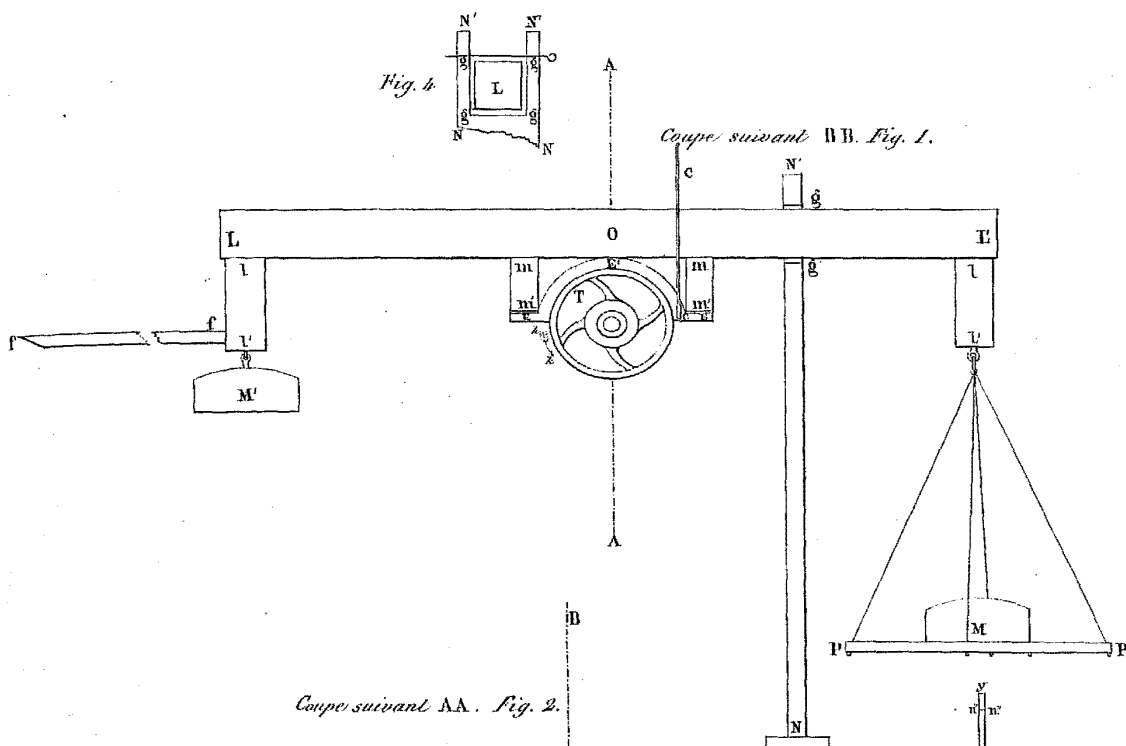
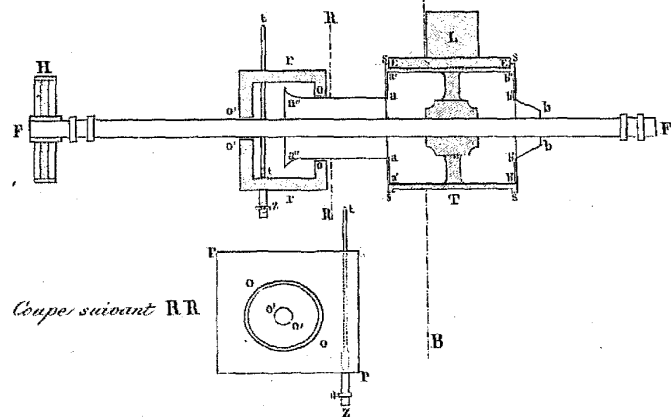


Fig. 4.

Coupe suivant BB. Fig. 1.

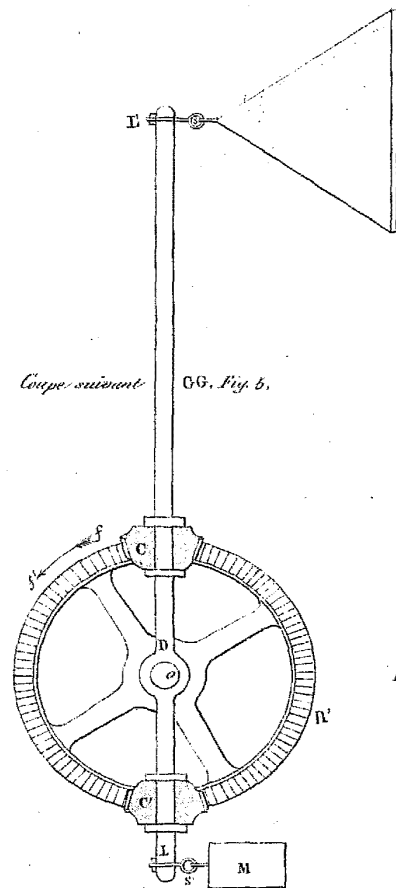
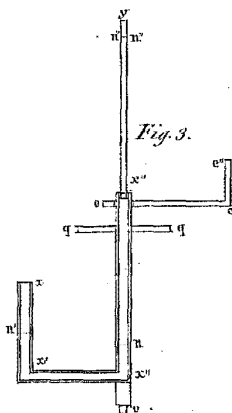


Coupe suivant AA. Fig. 2.



Coupe suivant RR

Fig. 3.



Coupe suivant GG. Fig. 5.

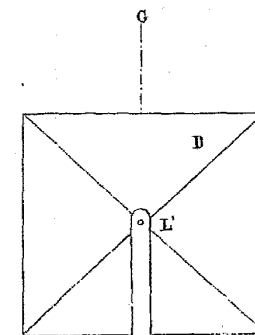


Fig. 6.

